

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
« ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА »**



РОЗУМНІ ТЕПЛОВІ ПОЛЯ

Монографія

Дніпро

НТУ

2018

Рекомендовано вченою радою ДВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол № 20 від 26.12.2017).

Рецензенти:

А.І. Купін, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж ДВНЗ «Криворізький національний університет»;

М.І. Стаднік, д-р техн. наук, проф. Вінницького національного аграрного університету.

Автори: Бубліков А.В., Заславський О.М., Проценко С.М., Ткачов В.В.

Розумні теплові поля /А.В. Бубліков, О.М. Заславський, С.М. Проценко, Р 64 В.В. Ткачов ; М-во освіти і науки України, НТУ «Дніпровська політехніка». – Дніпро, НТУ, 2018. – 180 с.

ISBN 978–966–350–675–3

Присвячена проблемі побудови та дослідження кіберфізичної системи «Розумне теплове поле», яка призначена для керування системою прямого електричного опалення приміщень з метою досягнення та підтримки комфортного температурного режиму. Головну увагу приділено задачі розподілення обмеженої потужності між розосередженими джерелами тепла в умовах, коли рівень обмеження безперервно випадково змінюється. Розглянуто два варіанти побудови алгоритму автоматичного розподілення енергії між джерелами тепла у розумному тепловому полі. Один з них базується на ідеї самоорганізації теплового поля, яка досягається колективною поведінкою автоматів, що керують джерелами тепла. Другий варіант передбачає створення в мережі розумного теплового поля коаліційних груп з розподіленням енергії шляхом синхронізації роботи обігрівачів у часі в багатоканальній системі масового обслуговування.

Розрахована на інженерно-технічних працівників та науковців, які займаються питаннями автоматизації процесів розподілення електричної енергії, а також на студентів і аспірантів вузів, які отримують освіту в галузі автоматизації виробничих процесів.

Іл. 82. Табл. 9. Бібліогр.: 72 назви.

Посвящена проблеме построения и исследования киберфизической системы «Умное тепловое поле», которая предназначена для управления системой прямого электрического отопления помещений с целью достижения и поддержания комфортного температурного режима. Главное внимание уделено задаче распределения ограниченной мощности между рассредоточенными источниками тепла в условиях, когда уровень ограничения непрерывно случайно изменяется. Рассмотрены два варианта построения алгоритма автоматического распределения энергии между источниками тепла в умном тепловом поле. Один из них опирается на идею самоорганизации теплового поля, которая достигается коллективным поведением автоматов, управляющих источниками тепла. Другой вариант предусматривает создание в сети умного теплового поля коалиционных групп с распределением энергии путём синхронизации работы обогревателей во времени в многоканальной системе массового обслуживания.

Расчитана на инженерно-технических работников и ученых, занимающихся вопросами автоматизации процессов распределения электрической энергии, а также на студентов и аспирантов вузов, получающих образование в области автоматизации производственных процессов.

Ил. 82. Табл. 9. Библиогр.: 72 назв.

© А.В. Бубліков, О.М. Заславський,
С.М. Проценко, В.В. Ткачов, 2018

© НТУ «Дніпровська політехніка» 2018

Зміст

Вступ	5
Глава 1	Пряме електричне опалення і керовані теплові поля 7
1.1	Актуальність і проблематика прямого електричного опалення 7
1.2	Теплові поля системи прямого електричного опалення 12
Глава 2	Енергетична ефективність керованого розподілу енергії в розумному тепловому полі 26
2.1	Змістовна постановка задачі 27
2.2	Формалізація задачі в контексті теорії масового обслуговування 30
2.3	Приклад вирішення задачі оптимізації інтелектуальної мережі прямого електричного опалення 34
Глава 3	Синергетичний підхід до побудови розумного теплового поля. Алгоритми самоорганізації інтелектуальної мережі прямого електричного опалення 36
3.1	Загальні принципи колективної поведінки автоматів 38
3.2	Принципи самоорганізації колективу автоматів, що розподіляють обмежений ресурс, користуючись локальним правилом поведінки «все, або нічого» 44
3.3	Алгоритм самоорганізації розумної мережі прямого електричного опалення 55
3.4	Принципи побудови (конструкція) кінцевого автомату, який використовується для колективного розподілу потужності між опалювальними пристроями 64
3.5	Імітаційне моделювання процесу самоорганізації розумного теплового поля 67
3.5.1	Імітаційна модель розумного теплового поля та її складові 69
3.5.2	Результати імітаційного моделювання процесу самоорганізації розумного теплового поля 76
Глава 4	Алгоритм коаліційної організації інтелектуальної мережі прямого електричного опалення 91
4.1	Алгоритм керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи 92
4.2	Розробка моделі системи керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи у математичному пакеті MATLAB 109
4.3	Дослідження ефективності алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи 115

4.4	Результати моделювання процесів розумного теплового поля, керованого коаліційними групами	125
4.5	Дослідження роботи системи керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації за умови різних ситуацій при обігріві приміщень із використанням її експериментального зразку	136
Глава 5	Системотехніка розумних теплових полів	149
5.1	Аналіз технічних рішень, які можуть бути використані для побудови інтелектуальних мереж прямого електричного опалення	149
5.2	Принципи технічної реалізації ідеї розумного теплового поля	158
5.3	Інтелектуальний вимірювач електричної потужності	163
5.4	Принципи побудови інформаційної мережі розумного теплового поля	169
	Висновок	174
	Перелік посилань	177

Вступ

Одного листопадового вечора двоє молодих людей зимно шулячись на холодному повітрі, йшли вулицею великого міста. Вулиця була так собі, не центральна, без яскравих вітрин і реклам. Зате по обидва боки теплим світлом горіли вікна. Дівчина, заглядаючи то в одне вікно, то в інше, казала своєму супутнику: коли-небудь і в нас з тобою буде свій великий будинок, в ньому буде багато кімнат. Хлопець посміхався: як середньовічний замок, еге ж? Ось тільки замки, схоже, погано опалювалися. І ми, Аню, будемо бродити з кімнати, в кімнату в пошуках теплого містечка. Ні, сказала Аня, нехай тепло слідкує за нами в нашому домі. Там, де ми нехай буде тепло, а там, де нас немає і нікого іншого немає, може бути і прохолодніше. Він запитав, включаючись в гру: а що буде, якщо ми розійдемося в різні кімнати? Який ти тупий - відповіла вона. Ну, це ж так просто. Частина тепла піде за тобою, а частина за мною. Хлопець з подивом глянув на супутницю. Це що, фентезі або інфа з інету? Ні, сказала вона. Це я прямо зараз придумала.

Денис із задоволенням, до хрускоту в суглобах, потягнувся, відкинувшись від монітора. Ідея, по-справжньому цікава ідея, вимальовувалася. На чотирнадцятій сторінці все і вирішилося. Останнє рівняння, що розмістилося в самому останньому абзаці, явно про це свідчило. Він глянув на годинник. Нічого собі - три години підряд, не відриваючись від компа! Не завадило б хоч кави ковток. Йдучи на кухню, підморгнув своєму відображенню у дзеркалі: а що, Денис Олександрович, слабо Вам в розумі відновити весь ланцюжок міркувань, які призводять до такого нетривіального результату? Однак, слабо, сказав він собі, наливаючи воду з фільтра і включаючи чайник. Не завадило б зберегтися. Він вже дійшов до свого столу і знайшов мишку, коли почув дзвінкий щиголь і світло згасло.

Вам знайома така ситуація? Це означає, що ви можете пригадати всі ті слова, які вимовляються в подібному випадку. Особливо, якщо згадуєш, що автозбереження було відключено, а блок безперервного живлення так і не був придбаний. Але що ж сталося? Через що спрацював автоматичний вимикач на вводі електроенергії в квартиру? Якщо не враховувати вплив потойбічних сил, домовиків та інших демонів, то виходить, що, швидше за все, було перевищено допустиме навантаження мережі електроживлення. А що ж було включено? Ну, ось, комп'ютер – це Ватт 500, ще, звичайно, нещасливий чайник-1000 Ватт, телевізор -300 Ватт, можливо, саме в цій невідповідний момент на кухні хтось включив мікрохвильовку – ще 700 Ватт. Ну і, звичайно ж, два нагрівача по 1500 Ватт кожен, як на зло були включені обидва – один в їдальні, інший в спальні. Всього виходить 5500 Ватт, не рахуючи ще скільки-то Ватт освітлення, а

допустима потужність електроспоживання квартири – 5000 Ватт. Все зрозуміло. Денис задумався: а що, якби був такий домашній робот, який стежив би за розподілом енергії в будинку, включаючи і вимикаючи такі електроприлади як нагрівачі, не допускаючи подібних ситуацій і забезпечуючи теплом ті приміщення, які в ньому найбільше потребують.

Емілія включила комп'ютер і запустила банківський сервіс online. Мала відбутися серйозна робота – комунальні платежі. Сьогодні на ранковій оперативці почула цілком очікувану новину про чергове підвищення тарифів, в тому числі і на теплову енергію. Тому, ще йдучи з роботи, вирішила: увечері не відкриваю фейсбук, доки не сплачу комуналку. Отже, читаємо – тариф на опалення для будинків без приладів обліку теплоенергії – 37 грн за кв. метр житлової площі. Спасибі, хоч не беруть плату за опалення нежитлової площі. Множу, значить, я цей тариф на свої 40 кв. метрів цілком житлової площі і отримую, ... ні, на жаль, віддаю 1480 грн. Емілія замислилася. Нещодавно натрапила в інтернеті на повідомлення про те, що в Європі все більшої популярності отримує пряме електричне опалення. Стало цікаво, що це таке. Виявилось – немає нічого простішого – електричні нагрівачі, які можна розміщувати в просторі квартири як завгодно і навіть переставляти з місця на місце, якщо хочеться. Ну, ще, звичайно, можна теплі стіни і теплу підлогу. Загалом, за ваші гроші – будь-який каприз. А фішка тут в тому, що можна самій керувати подачею тепла, розподіляючи його на свій розсуд, в залежності від погоди і настрою. Електроенергія теж коштує грошей, але тут за них я отримую тепло в тій кількості, а також в тому місці і в той час, який сама вибираю, а централізованого тепла завжди не вистачає, коли на вулиці мороз. А коли настає відлига, доводиться відкривати вікна. Як сказав один знайомий фізик: ти Емілія платиш не за тепло, призначене тобі, а за збільшення ентропії у всьому нашому світі.

Про що ж мріють Анна, Денис та Емілія?

Про те, щоб потужність прямого електричного опалення автоматично розподілялася в просторі опалювального об'єкта відповідно до пріоритетів тих, хто ним користується.

А також про те, щоб величина цієї потужності автоматично підтримувалася на такому рівні, при якому сумарне електроспоживання опалювального об'єкта не перевищувало б встановлений ліміт.

І ще про те, щоб зменшити плату за тепло.

Глава 1. Пряме електричне опалення і керовані теплові поля

1.1 Актуальність і проблематика прямого електричного опалення

Одним з найбільш перспективних і швидкозростаючих видів опалення є пряме електричне опалення. В Німеччині, Іспанії стаціонарними системами електроопалення обладнані близько 30% всіх будівель, в Фінляндії і Франції – понад 40%, в Англії і Норвегії їх частка перевищує 80%. Суттєво поширений даний вид опалення в Канаді, а також активно використовується і в США. Популярність електроопалення в Європі викликана не дешевизною електроенергії. Навпаки, в Європі тарифи на електрику вище, ніж у нас. Просто ніяка інша опалювальна система не в змозі забезпечити людині той рівень комфорту, економічності, безпеки і надійності, який дає пряме електричне опалення [1]. Порівняльна діаграма використання прямого електричного опалення в країнах західної Європи приведена на рис. 1.1

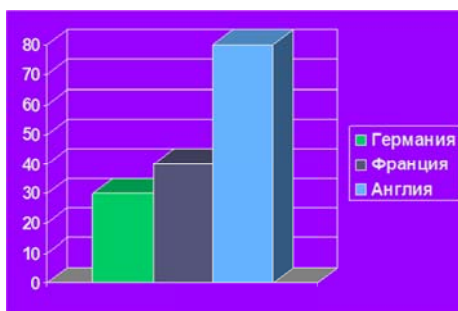


Рисунок 1.1 – Пряме електричне опалення в європейських країнах

Енергетична політика України не може будуватися на дорогому імпортованому джерелі – газі. Виробництво електроенергії в нашій країні перевищує споживання. Надлишки (4,3 млрд. кВт * год в 2009 р.) виробленої електроенергії експортуються. Ми займаємо 4-е місце в світі за обсягами виробництва електроенергії на одного жителя. Застосування електроенергії для опалення дозволяє вигідно використовувати недорогу «нічну» електроенергію, зменшуючи навантаження на енергомережі в денні години «пік». Внаслідок нічного провалу споживання електричної енергії утворюється її надлишок. Якщо цю електроенергію направити на електроопалення, то можна буде заощадити близько 3 млрд. куб. м природного газу на рік.

З електроопаленням дуже добре узгоджується атомна енергетика. В Європі його частка практично пропорційна частці атомної енергетики. Україна, яка вже зараз виробляє 58% електроенергії на атомних станціях і займає 3 місце в світі по її споживання на душу населення, просто приречена на впровадження електротехнологій в опаленні в найближчий час.

За прогнозами фахівців найближчим часом зростання цін на всі енергоносії (газ, центральне опалення та ін.) збережеться. Причому, потенціал зростання цін до рівня світових найбільший у газу, найменший у електроенергії; з урахуванням використання пільгового нічного тарифу на електроенергію ефективність електроопалення на порядок вище центрального водяного і на 15-20% дешевше опалення газом. Порівняльна діаграма відносної вартості різних видів опалення, наведена на рис. 1.2.

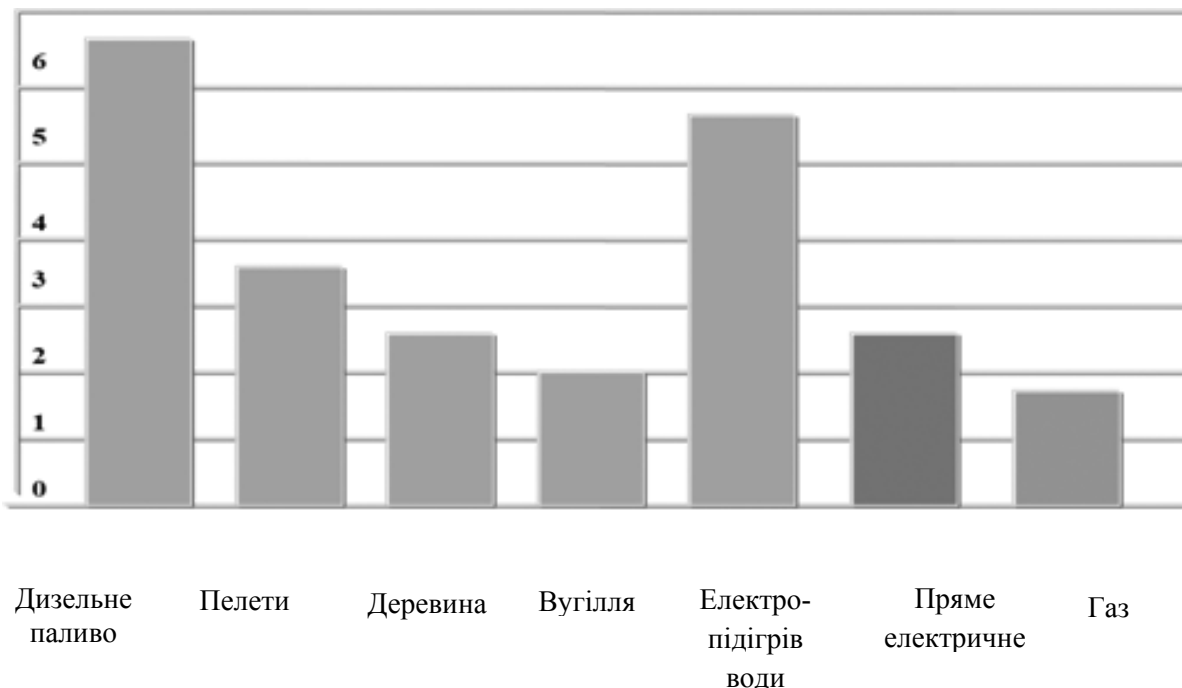


Рисунок 1.2 – Діаграма відносної вартості різних видів опалення

Всі види палива, за винятком електрики, в більшій чи меншій мірі забруднюють навколишнє середовище. При спалюванні природного газу утворюється рідкий конденсат, а при згорянні солярки – цілий букет легких отруйних хімічних речовин. Також, добре відома шкода твердого палива, як для людини, так і для навколишнього середовища. Сучасні електричні опалювальні прилади створюють оптимальне середовище існування для людини, не

спалюючи кисень і не порушуючи баланс вологості. Всі вони мають надійний захист від електромагнітних випромінювань.

Однією з найважливіших переваг прямого електричного обігріву житла є можливість змінювати температуру в кожному окремому приміщенні. Це дозволяє не тільки економити електроенергію за рахунок установки мінімальної температури обігріву в безлюдному на даний момент приміщенні, але і створює комфортне середовище проживання з урахуванням температурних переваг всіх мешканців будинку.

Швидкість нагріву і можливість виборчого нагріву окремих зон, висока мобільність джерел тепла, що дозволяє легко здійснювати реконфігурацію теплових потоків, керованість і спостережливість процесу опалення, екологічна безпека. Ці та інші переваги дозволяють використовувати пряме електричне опалення в котеджах, заміських будинках, складських приміщеннях, на спортивних майданчиках, в лікарнях, гуртожитках, квартирах багатоповерхових забудов і т.п.

У зв'язку зі складною економічною ситуацією в країні гостро постало питання економії природного газу та здійснення заходів щодо його заміщення. Одним з таких заходів є встановлення стимулюючого тарифу на електричну енергію для споживачів природного газу і теплової енергії, які перейшли на використання електроенергії для опалення і підігріву води.

Тому НКРЕКП збільшила нормативні обсяги споживання електричної енергії для населення, що проживає в будинках (квартирах), обладнаних у встановленому порядку електроопалювальними установками, з 3600 до 5000 кВт*год (постанова уряду № 540 «Про стимулювання споживачів природного газу і теплової енергії до переходу на використання електричної енергії для опалення та підігріву води»). Для цієї категорії населення застосовується найнижчий тариф на електроенергію. Ухвалення цього рішення сприятиме заохоченню побутових споживачів до використання електроопалювальних приладів замість тих, що працюють з використанням природного газу. Крім цього, заміна побутовими споживачами опалювального

обладнання, що працює з використанням природного газу, на електроопалювальні установки з використанням диференційованого за періодами часу обліку електроенергії зменшить щомісячні витрати на опалення приміщень.

З огляду на те, що зростання цін на газ значно випереджає лінію підвищення електротарифів, фахівці вже зараз прогнозують підвищення попиту на системи електрообігріву, які, судячи з усього, будуть обходитися набагато дешевше, ніж централізоване опалення і навіть газовий опалювальний котел.

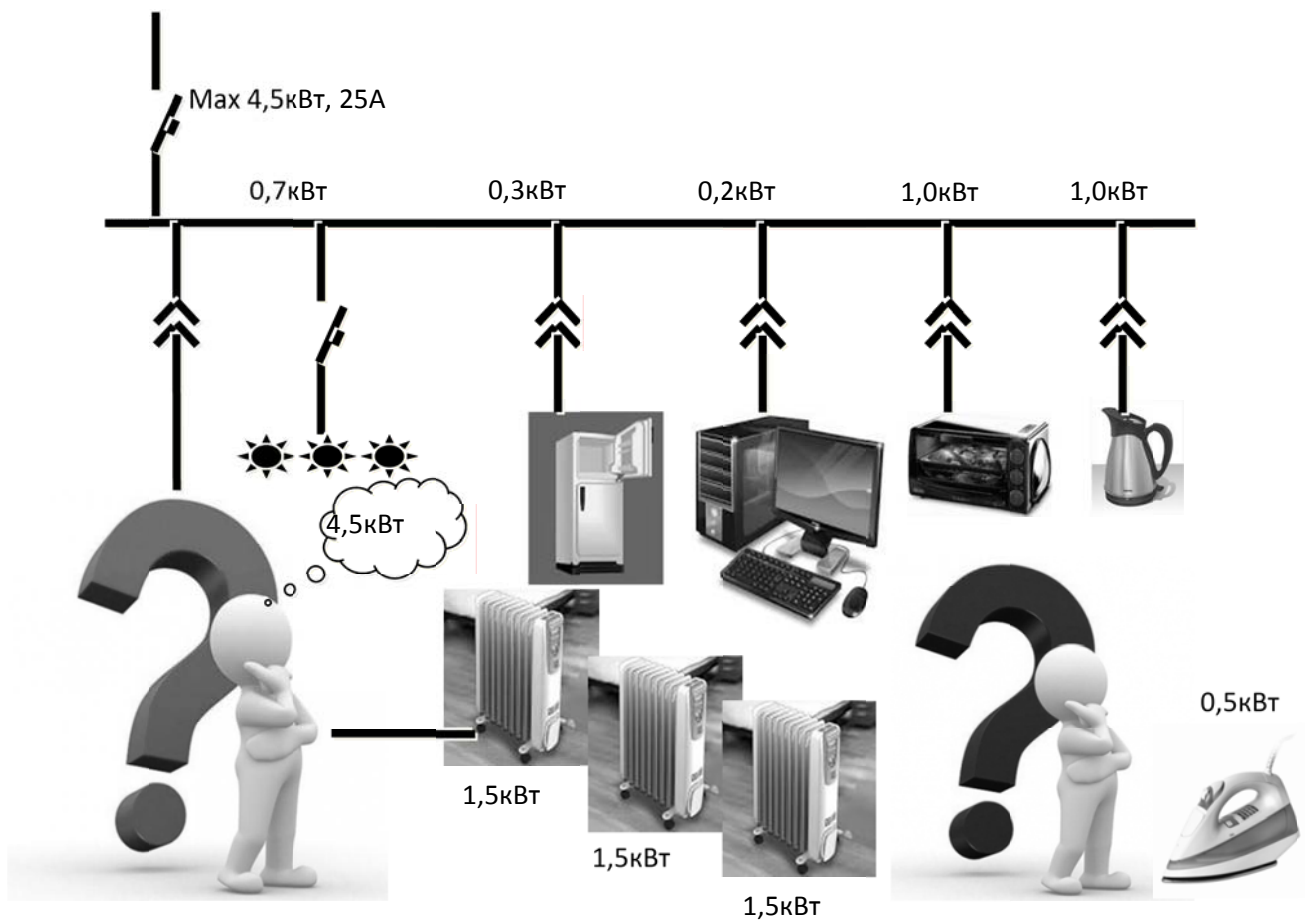


Рисунок 1.3 – Ілюстрація проблеми підключення прямого електричного опалення до мережі електропостачання квартири

Для опалення 10 кв.м площі в добре утепленому приміщенні з стелями не вище 3 м знадобиться потужність близько 1 кВт. Отже, для опалення 3-х кімнатної квартири площею 60 кв.м буде потрібно потужність близько 6 кВт. Однак електромережі в більшості багатоповерхових будинків просто не

витримають подібного навантаження, якщо вона буде затребувана всіма споживачами одночасно. Таким чином, суттєвим стримуючим фактором при впровадженні електричного опалення є обмеження потужності в мережі електропостачання опалювального об'єкта на рівні, який в загальному випадку може бути значно нижче сумарної встановленої потужності нагрівачів, необхідних для підтримки комфортного розподілу температур (рис. 1.3).

Перевищення ліміту потужності можна уникнути, синхронізуючи роботу нагрівальних пристроїв з іншими електроспоживачами так, щоб автоматично здійснювався перерозподіл потужності. Можливість такого регулювання обумовлена з одного боку інерційністю електронагрівальних приладів, а з іншого – повторно-короткочасним режимом роботи побутових електричних пристроїв (холодильник, праска, пральна машина і т.п.).

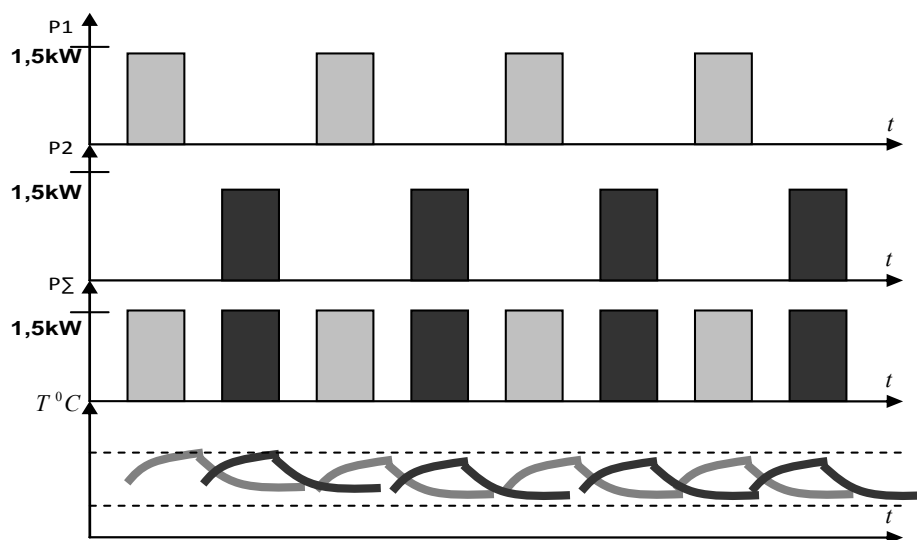


Рисунок 1.4 – Обмеження потужності прямого електричного опалення за рахунок синхронізації включень і відключень нагрівальних пристроїв
 $P1$, $P2$ – номінальні потужності нагрівачів, $P\Sigma$ – сумарна потужність системи електричного опалення, $T^{\circ}C$ – температура джерела тепла

Зазначена проблема може бути вирішена шляхом упорядкування в часі станів нагрівальних пристроїв. Процес прямого електричного опалення повинен бути керованим. Це означає, що в кожен момент часу сумарна потужність включених нагрівальних пристроїв не повинна перевищувати рівень допустимої потужності, який змінюється випадковим чином внаслідок включень і відключень різних електроприладів. Приклад синхронізації роботи

двох електричних нагрівачів, що включаються і відключаються власними термостатами при досягненні заданих температур, показаний на рис. 1.4.

З наведених діаграм видно, що при відсутності взаємної синхронізації максимальна потужність, що витрачається на опалення, досягала б 3кВт, в той час як при наявності синхронізації вона становить всього лише 1,5 кВт. Перевищення допустимого рівня потужності можна уникнути, якщо робота нагрівальних пристроїв синхронізується не тільки один з одним, але і з іншими споживачами енергії таким чином, щоб автоматично перерозподіляти електроенергію. Можливість здійснення подібного автоматично керованого процесу обумовлена інерційністю електронагрівачів і переривчастим режимом роботи побутових електроприладів (холодильник, праска, пральна машина і т.п.).

1.2 Теплові поля системи прямого електричного опалення

Розумна система прямого електричного опалення є кіберфізична система [2, 3, 4, 5, 6, 7] керованих джерел тепла, розподілених в просторі опалювального об'єкта, пов'язаних один з одним і з навколишнім середовищем інформаційно і фізично. Метою функціонування цієї системи є управління тепловими потоками, що забезпечує заданий розподіл температур в просторі і часі опалювального об'єкта. Для досягнення цієї мети необхідно в кожен момент часу підтримувати таку потужність кожного джерела тепла, щоб з урахуванням всіх наявних обмежень, умов навколишнього середовища і законів теплового балансу підтримувати заданий в часі розподіл температур. У зв'язку з цим розподіл в просторі і часі потужності прямого електричного опалення будемо називати *тепловим полем*. Математично в загальному вигляді це поле описується скалярною функцією $P(x, y, z, t)$, яка представляє собою залежність від часу потужності точкового джерела тепла в точці з координатами (x, y, z) . Звичайно ж, в реальних умовах джерела тепла не є точковими. Однак подібну ідеалізацію можна вважати допустимою, якщо з її допомогою вдається знайти

закони управління потужністю джерел тепла, задовільні з точки зору поставленої мети.

Всі електричні обігрівачі, які використовуються в якості джерел тепла в теплових полях можна розподілити на кілька груп:

- масляні радіатори;
- конвектори;
- тепловентилятори;
- інфрачервоні кварцові випромінювачі;
- теплові підлоги і теплові панелі.

Всі вони працюють від електричної мережі.

Масляні радіатори – найпоширеніший вид електрообігрівачів. Масляні радіатори розсіюють тепло в усі сторони за рахунок нагрівання маслом їх металеві поверхні. Такі радіатори представляють собою електричну батарею, заповнену маслом (рис. 1.5).



Рис.1.5. Масляний радіатор

Прилади мають такі ж металеві ребра, як звичайні радіатори центрального опалення. Нагрівання приміщення відбувається поступово, проте найтепліше безпосередньо біля обігрівача. Температура поверхні масляного радіатора може досягати $110...150^{\circ}\text{C}$. Шкала номінальної потужності деяких популярних моделей масляних нагрівачів приведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Шкала номінальної потужності деяких популярних моделей масляних нагрівачів

Модель	Максимальна теплова потужність, кВт	Кількість секцій	Примітки
DELONGHI 05123M	1,2	5	
DELONGHI 061563	1,5	6	
DELONGHI 082063	2,0	8	
DELONGHI 102563	2,5	10	
DELONGHI TRRS 0715	1,5	7	
DELONGHI TRD 4820E	2,0	8	
DELONGHI TRRS 0920	2,0	9	
GENERAL NY23LA	2,3	11	Традиційні
GENERAL NY18LA	1,8	9	
GENERAL NY15LA	1,5	7	
GENERAL NY12LA	1,2	6	
GENERAL NY23M	2,3	13	З вузьким профілем
GENERAL NY18M	1,8	11	
GENERAL NY15M	1,5	9	
GENERAL NY12M	1,2	7	
GENERAL NY10M	1,0	6	
GENERAL NY24CA	2,4	11	Зі збільшеною тепловіддачею
GENERAL NY20CA	2,0	9	
GENERAL NY16CA	1,6	7	
GENERAL NY25LF	2,4	11	З вентилятором
GENERAL NY20LF	2,0	9	
GENERAL NY17LF	1,7	7	

Конвектори. Нагрівальні елементи цього приладу – ТЕНи, сталеві вигнуті драти в захисному металевому корпусі, який нагрівається і віддає тепло. «Закриті» нагрівальні елементи складаються із сталевих трубчастих ТЕНів, на яких закріплено спеціальний ребристий дифузор. Наявність дифузора збільшує площу контакту холодного повітря з ТЕНом, що дозволяє отримати більш

інтенсивну віддачу тепла і посилити конвекцію. Перевага даної конструкції ще і в тому, що «закриті» ТЕНи не мають відкритих нагрівальних спіралей, і тому не пересушують повітря.

Конвекторні обігрівачі поширюють тепло за рахунок природної конвекції, коли нагріте повітря піднімається вгору, поступаючи місцем холодному. З цією метою їх конструкція забезпечує вільний доступ повітряного потоку знизу до нагрівачів і викид нагрітого повітря вгору. Температура ТЕНа може досягати 250 градусів. Термостат здійснює підтримку заданої температури в приміщенні. Залежно від моделі конвектора, термостат може бути механічним або електронним. При включенні обігрівача температура в приміщенні через деякий час досягає заданого значення, в цей час термостат самостійно відключить конвектор. При падінні температури в приміщенні нижче заданої, термостат так само самостійно включить конвектор, таким чином підтримується задана температура в приміщенні.

Потужність конвекторного обігрівача від 500 до 2500 Ватт і може регулюватися східчасто (в деяких моделях кроками по 250 Ватт). Загальний вид настінного конвектора показаний на рис. 1.6.



Рисунок 1.6 – Настінний конвектор

Моделі електричних конвекторів випускаються різних розмірів.

Стандартні – висота 400 – 450 мм.

Високі – висота 600 – 650 мм.

Низькі – висота 250 – 350 мм.

Так само випускаються моделі електричних конвекторів висотою понад 800 мм (вузькі) і плінтусні висотою до 250 мм.

Глибина (товщина) конвекторів, обладнаних ТЕНами, зазвичай не більше 100 мм, конвектори зі спіраллю близько 200 мм.

Параметри деяких типів конвекторів наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Параметри деяких типів конвекторів

Модель	Потужність, кВт	Розмір, мм	Примітки
EWT Clima	2,0	660x450x200	
240 TGL	2,0	750x450x220	
Nobo C2F02	2,5	475x200x87	
Nobo C2F05	2,5	775x200x87	

Теплові вентилятори (рис. 1.7). Принцип влаштування теплових вентиляторів приблизно такий же, як і у конвекторів, але замість ТЕН прута гріючим елементом є тонка металева спіраль. Потік нагрітого повітря формується вентилятором.



Рисунок 1.7 – Тепловий вентилятор

Теплові вентилятори поширюють тепло від розігрітої металевої спіралі і розсіюють зігріте нею повітря за допомогою вентилятора. Переваги теплових вентиляторів:

- дуже швидко нагрівають повітря;
- захищені від перегріву;
- завдяки термостату автоматично регулюють встановлену температуру;
- відключаються в разі падіння.

Тепловентилятор можна встановити на підлозі або прикріпити до стіни. Деякі види обігрівачів забезпечені додатковими реле вертикального положення, які відключають прилади, якщо вони випадково перекинуться.

Потужність опалення регулюється термостатом. Спеціальний термозапобіжник захищає апарат від перегріву. Також більшість сучасних тепловентиляторів мають спеціальний захист від випадкового попадання води. Технічні характеристики деяких моделей теплових вентиляторів наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики деяких моделей теплових вентиляторів

Мо- дель	Ступені потужності, кВт	Витрата повітря, куб.м/час	Рівень шуму ^{*1} , Дб (А)	$\Delta t^{\circ}C$ ^{*2}	Напруга, В	Сила струму, А	Габарит, мм
С3	0/1,5/3	280	41	32	230 – 400В3N ^{*3}	13,2/4,4	255x335x276
С5	0/2,5/5	480	40	31	400В3N	7,3	255x335x276
С9	0/4,5/9	720	44	37	400В3N	13,1	315x405x335

^{*1} Відстань від тепловентилятора 3м. Фактор спрямованості – 2. Еквівалентна площа звукопоглинання 200кв.м.;

^{*2} підйом температури повітря, що проходить через нагрівач при повній потужності;

^{*3} модель С3 може підключатися до мережі як на однофазній напрузі 230В, так і на трифазній напрузі 400В.

Інфрачервоні кварцові випромінювачі. Прилади, призначені для передачі тепла шляхом випромінювання нагрітої поверхнею променів довгохвильового спектру, називають інфрачервоними нагрівачами. Нагрівальний елемент інфрачервоних кварцових випромінювачів – кварцова лампа у вигляді трубки, захищеної металевим корпусом (рис. 1.8). Інфрачервоний кварцовий випромінювач, на відміну від інших приладів, нагріває не повітря, а певну поверхню або предмет, на який спрямований промінь лампи.



Рисунок 1.8 – Інфрачервоний кварцовий випромінювач

За допомогою зонального обігріву в приміщенні (рис. 1.9) можна створити як теплі ділянки, так і більш прохолодні. Це істотно скорочує грошові витрати, дозволяючи знижувати середню температуру повітря в приміщенні шляхом створення комфортних умов саме там, де необхідно. Таким чином, застосування інфрачервоних обігрівачів дозволяє заощадити електроенергію без шкоди для комфорту людей. В цьому і укладена одна з основних переваг інфрачервоних систем: вони забезпечують, причому адресно, виключно високу тепловіддачу, економлячи до 40% витрат на опалення. Більш низька вартість електроенергії в нічний час може бути використана для акумулювання тепла внутрішніми конструкціями будівлі і обладнанням. Простота обслуговування і відсутність рухомих частин, повітряних фільтрів і масел обумовлюють довгий термін служби обігрівачів.

Майже всі обігрівачі можуть бути оснащені тріступінчатим регулятором потужності. Інфрачервоні обігрівачі можуть бути виконані у вигляді касет розміром зі стандартну стельову плитку (600 x 600 мм), що вбудовуються в підвісну стелю.

Існують обігрівачі стельового або настінного кріплення, потужністю 0,4-1,2 кВт, які кріпляться на монтажній арматурі системи освітлення або на тросі. Для приміщень з високими стелями (до 16 м), відкритих майданчиків та локального обігріву рекомендуються високотемпературні обігрівачі.



Рисунок 1.9 – Приклад зонального обігріву з використанням ІЧ – випромінювачів

Для великих приміщень випускають інфрачервоні обігрівачі потужністю 0,8-4,2 кВт з фіксованими панелями і промислові моделі потужністю до 6 кВт для вибіркового або повного обігріву (при висоті стель більше 4,5 м). Вони можуть служити основою опалювальною системою промислових цехів, спортивних арен, відкритих майданчиків навантажувальних терміналів і т. п. Забезпечуючи ефективний і комфортний місцевий обігрів. Теплове

випромінювання являє собою електромагнітну енергію. Інтенсивність теплового потоку і його характеристики залежать безпосередньо від температури і поверхні випромінюючих об'єктів. Чим вище температура, тим коротше довжина хвилі і вище інтенсивність випромінювання. Температура поверхні, що випромінює інфрачервоних обігрівачів від 100°C до 950°C в залежності від області застосування. Для житлових будинків з висотою стель 2,5-3,5 м припустима температура випромінюючої поверхні $100-120^{\circ}\text{C}$. Це найбільш м'яке і безпечне випромінювання. Для відкритих майданчиків, балконів з висотою більше 3,5 м можуть бути використані температури випромінюючої поверхні до 950°C .

Тепла підлога. На відміну від розглянутих вище обігрівачів, які є локальними джерелами тепла, тепла підлога являє собою розподілене в просторі джерело тепла (рис. 1.10).

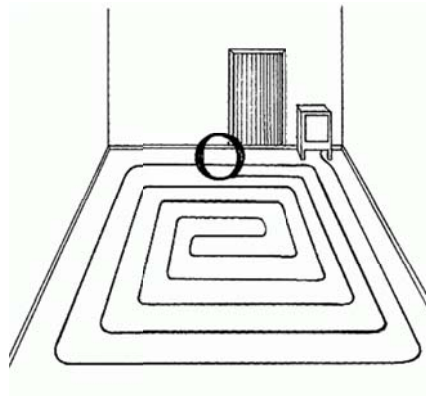


Рисунок 1.10 – Приклад заповнення опалювальної площі спеціальним нагрівальним кабелем
Схема влаштування теплої підлоги показана на рис. 1.11.

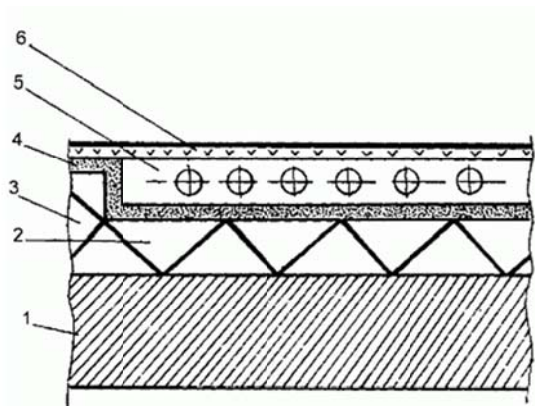


Рисунок 1.11 – Конструктивна побудова теплої підлоги
1 – конструкція перекриття; 2 – теплова ізоляція; 3 – крайова ізоляція; 4 – гідроізоляція;
5 – шар бетону з нагрівальним контуром; 6 – покриття для підлоги

Питома потужність системи тепла підлога (табл. 1.4) залежить від типу підлогового покриття.

Таблиця 1.4 – Нормативні значення питомої потужності поверхні теплої підлоги

Тип підлогового покриття	Потужність, Вт/м²
Підлога з дерев'яним покриттям	55
Підлога з монолітної основою (бетон) під дерев'яним покриттям, теплоізольована	80
Підлога з монолітної основою під дерев'яним покриттям, не теплоізольована	100
Підлога з монолітної основою під будь яким покриттям (окрім дерев'яного), теплоізольована	100...130
Тип підлогового покриття	Потужність, Вт/м²
Підлога з монолітної основою під будь яким покриттям (окрім дерев'яного), волога (ванна кімната або суміщений санвузол), що не теплоізольована від міжповерхового перекриття	130...160
Підлога з монолітної основою під будь яким покриттям (окрім дерев'яного), мокра (душова, обхідні доріжки басейну и т.д.), що не теплоізольована	150...200

Нагрівальними елементами теплої підлоги є кабельні конструкції, що складаються з струмопровідної нитки резистивного типу, що виділяє тепло і шару тефлонової ізоляції з термостійкого ПВХ-пластика. Такі кабелі можуть бути виготовлені з однієї внутрішньої струмопровідної жилою або двома. В системі теплої підлоги також можуть застосовуватися конструкції саморегульованого нагрівального кабелю. Вони мають звичайні струмопровідні, а не нагрівальні жили, між якими розташована напівпровідникова матриця. Коли якась ділянка саморегулюючого кабелю охолоджена, всередині матриці за рахунок напівпровідників створюється структура з великою кількістю доріжок для проходження через них струму, який нагріває кабель і навколишні його шари. При середній температурі структура напівпровідників збільшує електричний опір, знижуючи умови для протікання через них струму і, тим самим, трохи зменшує виділення тепла. Якщо якась ділянка кабелю сильно нагріта, то кількість доріжок для проходження струму в ньому різко обмежується, знижуючи його електричну провідність. Таким способом відбувається регулювання температури обігріву

навколишнього середовища навіть без терморегулятора і датчиків температури. Саморегульовані кабелі більш зручні в експлуатації тому, що не потребують створення однорідної структури для передачі тепла, як їх резистивні аналоги. Їх окремі ділянки можна піддавати різним температурним навантаженням.

Теплові поля можуть створюватися розподілом в просторі опалювального об'єкта будь-яких з перерахованих вище нагрівальних пристроїв або їх комбінацій. Так, наприклад, теплове поле замиського котеджу може включати зони, опалювальні конвекторами або масляними радіаторами, а також зони, опалювальні інфрачервоними випромінювачами і зони теплих підлог. Якщо кожна зона може функціонувати незалежно від інших зон і при цьому, всі разом і частково, вони не обмежені в споживанні електроенергії, то щодо такої системи опалення поняття теплового поля не актуальне. Однак подібні системи є скоріше винятком, ніж правилом.

Математична модель теплового поля, що включає рахункову безліч теплових зон, пов'язаних між собою потоками енергії, описується рівняннями теплового балансу [8, 9], а також системою обмежень, що включає обмеження на споживану електричну потужність і обмеження, що накладаються на розподіл температур. При цьому в рівняннях теплового поля враховується лише розподіл середніх температур $T_i(t)$ теплових зон $z_i \in Z$. Це пов'язано з тим, що рівняння теплового поля описують розподіл по тепловим зонам потужностей джерел тепла $P_i(t)$ без урахування їх координатного розташування в просторі опалювального об'єкта. Система рівнянь, що описує теплове поле об'єкта прямого електричного опалення, включає наступні блоки рівнянь.

Блок рівнянь, що описують процес генерації тепла

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{H1} \frac{dT_{H1}}{dt} = P_1(t) - (T_{H1}(t) - T_{R1}(t))\sigma_{H1}, \\ C_{H2} \frac{dT_{H2}}{dt} = P_2(t) - (T_{H2}(t) - T_{R2}(t))\sigma_{H2}, \\ \dots, \\ C_{Hi} \frac{dT_{Hi}}{dt} = P_i(t) - (T_{Hi}(t) - T_{Ri}(t))\sigma_{Hi}, \\ \dots, \\ C_{Hn} \frac{dT_{Hn}}{dt} = P_n(t) - (T_{Hn}(t) - T_{Rn}(t))\sigma_{Hn}, \end{array} \right. \quad (1.1)$$

де C_{Hi} – теплоємність i -го джерела тепла (якщо обігрів здійснюється ІЧ-випромінювачами, то в якості джерела тепла приймається матеріальний об'єкт, який зазнає впливу променевої енергії), $T_{Hi}(t)$ – середня температура поверхні i -го джерела тепла, $T_{Ri}(t)$ – середня температура повітря в i -ій тепловій зоні, σ_{Hi} – коефіцієнт тепловіддачі i -го джерела тепла, $P_i(t)$ – потужність i -го джерела тепла.

Блок рівнянь, що описують взаємні потоки енергії між тепловими зонами

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{R1} \frac{dT_{R1}}{dt} = \sum_{j=1}^n (T_{Rj}(t) - T_{R1}(t))\sigma_{Rj1}, \\ C_{R2} \frac{dT_{R2}}{dt} = \sum_{j=1}^n (T_{Rj}(t) - T_{R2}(t))\sigma_{Rj2}, \\ \dots, \\ C_{Ri} \frac{dT_{Ri}}{dt} = \sum_{j=1}^n (T_{Rj}(t) - T_{Ri}(t))\sigma_{Rji}, \\ \dots, \\ C_{Rn} \frac{dT_{Rn}}{dt} = \sum_{j=1}^n (T_{Rj}(t) - T_{Rn}(t))\sigma_{Rjn}, \end{array} \right. \quad (1.2)$$

де C_{Ri} – теплоємність i -ої теплової зони, σ_{Rji} – коефіцієнт теплопередачі між i -ою та j -ою тепловими зонами. Коефіцієнт теплопередачі через багатошарову стінку [10], що складається з M шарів

$$\sigma = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{m=1}^M \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.3)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від більш теплої зони до стінки Вт/м² *К, α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до більш холодної зони Вт/м² *К, λ_m – коефіцієнт теплопровідності n -го шару стінки Вт/м*К, δ_m – товщина n -го шару стінки.

Зміну температур на кордоні між тепловими зонами показано на рис. 1.12.

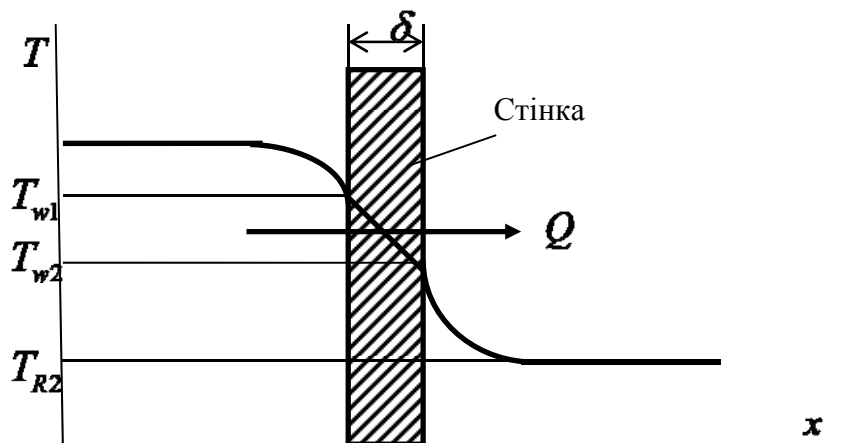


Рисунок 1.12 – Зміна температур на кордоні між тепловими зонами

Блок рівнянь, що описують обмеження потужностей джерел тепла

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \alpha_{1i} P_i(t) = P_1, \\ \sum_{i=1}^n \alpha_{2i} P_i(t) = P_2, \\ \dots, \\ \sum_{i=1}^n \alpha_{ki} P_i(t) = P_k, \\ \dots, \\ \sum_{i=1}^n \alpha_{Ki} P_i(t) = P_K, \end{array} \right. \quad (1.4)$$

де P_k – k -те обмеження потужності джерел тепла, α_{ki} – ваговий коефіцієнт i -го джерела тепла в k -ом обмеженні потужності, $K < n$. У найпростішому випадку, коли обмеження накладається лише на сумарну потужність теплового поля, маємо $K=1$, $\forall i (\alpha_i = 1)$.

Блок рівнянь, що описують обмеження середніх температур теплових зон

$$\left\{ \begin{array}{l} \int [T_{R1}(t) - T_{R1}^*(t)]^2 dt = \min, \\ \int [T_{R2}(t) - T_{R2}^*(t)]^2 dt = \min, \\ \dots, \\ \int [T_{Ri}(t) - T_{Ri}^*(t)]^2 dt = \min, \\ \dots, \\ \int [T_{Rn}(t) - T_{Rn}^*(t)]^2 dt = \min, \end{array} \right. \quad (1.5)$$

де $T_{Ri}^*(t)$ – задана термограма i -ої теплової зони, $T_{Ri}(t)$ – поточна середня температура i -ої теплової зони.

Задача управління тепловим полем полягає в знаходженні керуючих впливів $U_i(P_1, \dots, P_n, P_1, \dots, P_K, T_{H1}, \dots, T_{Hn}, T_{R1}, \dots, T_{Rn}, T_{R1}^*, \dots, T_{Rn}^*, t)$ на джерела тепла, які впливають на величини їх потужностей таким чином, щоб забезпечити

виконання обмежень (1.4, 1.5) з урахуванням динаміки теплових процесів, що описуються системами рівнянь (1.1, 1.2).

У даній монографії розглядаються теплові поля, керовані дискретними командами релейного типу. Для формування подібних команд в контури управління тепловими полями повинні бути включені кінцеві автомати. Таким чином, однією з центральних задач, що вирішуються в даній монографії, є розробка методів синтезу систем кінцевих автоматів для керування тепловими полями у кіберфізичній системі прямого електричного опалення приміщень.

Глава 2. Енергетична ефективність керованого розподілу енергії в розумному тепловому полі

Мало знати себе цену — надо еще пользоваться спросом...

Михаил Жванецкий

Кіберфізична [2] інтелектуальна мережа прямого електричного опалення «Розумне теплове поле» включає деяку множину електронагрівальних пристроїв, які розміщено в різних зонах опалювального об'єкта і підключено до загального джерела енергії спеціальними автоматичними пристроями – розумними *конекторами*, які в подальшому будемо називати *смартконами*. Останні, обмінюючись інформацією в реальному часі, формують в просторі опалювального об'єкту підсистему локальних джерел тепла, сумарна потужність яких не перевищує ліміт потужності, відведеної для задач опалення, яка випадково змінюється в часі. Склад цієї підсистеми в реальному часі змінюється таким чином, щоб підтримувати заданий розподіл температур в зонах опалення за умовою виконання обмеження її сумарної потужності.

В даній роботі ми обмежились розглядом лише таких розумних теплових полів, для побудови яких можуть бути використані серійні електронагрівальні пристрої (що розглянуті у попередній главі), обладнані власними термостатами, які звичайним способом контролюють температуру їх нагрівальної поверхні. Смарткони керують подачею потужності на електронагрівальні пристрої, які згодом відключаються власними термостатами за винятком тих випадків, коли виникає погроза перевищення ліміту потужності. В цих випадках смарткони виконують відключення опалювальних пристроїв, не чекаючи спрацьовування їх власних термостатів. Така побудова розумної системи прямого електричного опалення не потребує переробки існуючих електронагрівальних пристроїв і може розраховувати на інвестиційну підтримку виробників і постачальників їх ринкових моделей. В подальшому є можливість об'єднати функції смарткона та термостата в єдиному модулі у складі електронагрівального пристрою.

Автоматична реконфігурація розумного теплового поля відбувається кожного разу, коли виникає надлишок або дефіцит електричної потужності в мережі живлення системи опалення, таким чином, щоб її ліміт не був перевищений при найбільш повному використанні електричної енергії. Ті пристрої, які були до даного моменту часу відключені, утворюють чергу, в якій розігрується право на підключення до мережі електроживлення. Від тривалості часу очікування в цій черзі залежить амплітуда коливань контрольованих температур. Чим довше локальний опалювальний пристрій очікує підключення до мережі електроживлення, тим нижче опускається температура в місці його установки. Інтелектуальна мережа прямого електричного опалення повинна бути організована таким чином, щоб з урахуванням часу очікування середня потужність теплової енергії, яка віддається нагрівальними пристроями, була максимальною [12].

2.1 Змістовна постановка задачі

Нехай маємо n електронагрівальних пристроїв (нагрівачів) потужністю P_H кожний, розподілених в різних зонах опалювального приміщення. Всі нагрівачі живляться від загальної мережі електропостачання з обмеженим лімітом потужності \hat{P} , яка може використовуватися для цілей опалення. При цьому сумарна встановлена потужність нагрівачів може перевищувати цей ліміт:

$$nP_H \geq \hat{P}. \quad (2.1)$$

Нагрівачі об'єднані в інтелектуальну мережу прямого електричного опалення. У числі інших завдань ця мережа забезпечує в реальному часі (згідно ліміту потужності $\hat{P}_{\text{inf}} \leq \hat{P} \leq \hat{P}_{\text{sup}}$, який змінюється випадково) автоматичне формування такої підсистеми нагрівачів, одночасно підключених до мережі електропостачання в кількості k , яке забезпечує виконання обмеження $kP_H < \hat{P}$ і при цьому використовує максимальну кількість, відпущеної на опалення енергії:

$$0 \leq \hat{P} - kP_H < P_H. \quad (2.2)$$

Якщо нагрівач підключено до мережі живлення і ліміт потужності не перевищено, то його подальше відключення здійснюється його власним термостатом при досягненні заданої температури опалювальної поверхні.

Процес генерації теплового потоку локальним нагрівачем описується рівнянням теплового балансу [8,9]:

$$C_H \frac{dT_H}{dt} = P(t) - (T_H(t) - T_R(t))\sigma_H, \quad (2.3)$$

де C_H – теплоємність нагрівача, $T_H(t)$ – температура теплоносія нагрівача, $P(t) \in (0, P_H)$ – потужність нагрівача, $T_R(t)$ – температура зони обігріву, σ_H – коефіцієнт теплопередачі нагрівача.

При включенні нагрівача $P(t) = P_H$ здійснюється розігрів його опалювальної поверхні зі швидкістю тим більшою, чим більше потужність нагрівача:

$$\frac{dT_H}{dt} = \frac{P_H - (T_H(t) - T_R(t))\sigma_H}{C_H}. \quad (2.4)$$

При відключенні нагрівача $P(t) = 0$ після досягнення заданої температури теплоносія, накопичена в ньому енергія віддається опалювальній зоні. При цьому швидкість охолодження нагрівача практично не залежить від його потужності:

$$\frac{dT_H}{dt} = -\frac{(T_H(t) - T_R(t))\sigma_H}{C_H}. \quad (2.5)$$

На рис. 2.1 приведена діаграма процесів нагрівання та охолодження нагрівача.

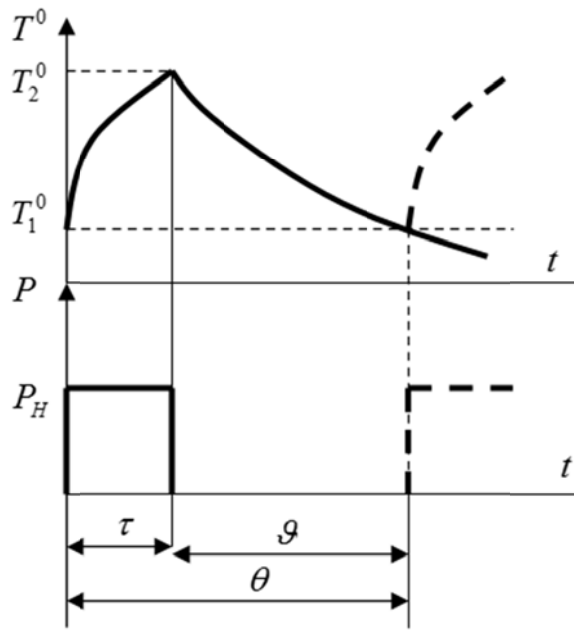


Рисунок 2.1 – Діаграма процесів нагрівання та охолодження нагрівача

де θ – проміжок часу, через який нагрівач запитує про підключення до мережі (потенціали-ний період включень нагрівача, який дорівнює сумі часу розігріву τ і часу охолодження g до початкової температури); T_1^0 – температура теплоносія нагрівача, при якій термостат підключає його до мережі живлення; T_2^0 – температура теплоносія нагрівача, при якій термостат відключає його від мережі електроживлення.

З рівнянь (2.4) і (2.5) отримаємо (нехтуючи зміною температури зони обігріву $T_R(t) \cong const$) наступні співвідношення:

$$\tau = -\frac{C_H}{\sigma_H} \ln \left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H \right), \quad (2.6)$$

$$g = -\frac{C_H}{\sigma_H} \ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0}, \quad (2.7)$$

$$\theta = -\frac{C_H}{\sigma_H} \left(\ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0} + \ln \left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H \right) \right). \quad (2.8)$$

Чим більше потужність нагрівача P_H , тим менше час розігріву τ до відключення нагрівача термостатом, протягом якого нагрівач користується

обмеженим ресурсом потужності мережі електропостачання, тим більше кількість нагрівачів, які можуть скористатися цим ресурсом протягом часу θ , тим менше може виявитися середній час очікування нагрівачем дозволу на підключення до мережі живлення. Однак зі збільшенням локальної потужності P_H при незмінному рівні обмеження допустимої потужності \hat{P} зменшується допустима кількість k одночасно включених нагрівачів, що створює тенденцію до збільшення середнього часу очікування нагрівачем дозволу на підключення до мережі живлення. Середня потужність, що віддається нагрівачем в опалювальну зону:

$$\bar{P}_H = P_H \cdot \frac{\tau}{\theta + \bar{t}}, \quad (2.9)$$

де \bar{t} – середній час очікування нагрівачем дозволу на підключення до мережі живлення.

Від величини цієї потужності залежить стає значення температури в опалювальній зоні. З огляду на неоднозначну залежність середньої потужності \bar{P}_H від локальної потужності нагрівача $P_H \cong \frac{\bar{P}}{k}$, представляє інтерес задача з'ясування характеру цієї залежності та розробка методу синтезу оптимальної мережі прямого електричного опалення, яка забезпечує можливість підтримки найбільш високої температури в опалювальних зонах.

2.2 Формалізація задачі в контексті теорії масового обслуговування

Будемо розглядати нагрівачі в якості клієнтів (в кількості n) багатоканальної системи масового обслуговування (СМО) з необмеженою чергою і пуассонівським потоком заявок [13, 14]. Ліміт потужності, що використовується для опалення, будемо вважати величиною постійною, що дорівнює середньому на безлічі рівномірно розподілених всіх можливих значень ліміту:

$$\langle \hat{P} \rangle = \frac{\hat{P}_{\text{inf}} + \hat{P}_{\text{sup}}}{2}. \quad (2.10)$$

Допустиму кількість k одночасно включених нагрівачів будемо розглядати в якості k каналів одночасного обслуговування заявок в СМО. Потік заявок будемо вважати найпростішим. Час роботи нагрівача τ з моменту включення до моменту відключення власним термостатом будемо розглядати в якості середнього часу обслуговування заявки, розподіленого по показовому закону. Проміжок часу θ , через який нагрівач запитує про підключення до мережі (потенційний період включень нагрівача), будемо розглядати в якості середнього періоду надходження заявок від одного клієнта.

Інтенсивність потоку заявок, що надходять від n клієнтів:

$$\lambda = \frac{n}{\theta}. \quad (2.11)$$

Інтенсивність потоку обслуговування:

$$\mu = \frac{1}{\tau}. \quad (2.12)$$

Коефіцієнт завантаження СМО:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (2.13)$$

Для того, щоб черга заявок необмежено не збільшувалась, в системі повинен існувати стаціонарний режим. Відсутність стаціонарного режиму в мережі прямого електричного опалення означає, що деякі опалювальні зони можуть опинитися відключеними від джерел тепла на невизначено довгий час. Наявність стаціонарного режиму є критерієм стійкості розумного теплового поля. Відомо, що для СМО розглянутого класу стаціонарний режим існує, якщо відношення коефіцієнта завантаження системи до числа каналів менше одиниці:

$$\chi = \frac{\rho}{k} < 1. \quad (2.14)$$

Підставляючи в (2.14) значення ρ , μ , λ з формул (2.11, 2.12, 2.13), отримаємо:

$$\frac{n}{k} < \frac{\theta}{\tau}. \quad (2.15)$$

Відношення потенційного періоду включень нагрівача до часу його розігріву виразимо через параметри нагрівача з рівнянь (2.6...2.8)

$$\frac{\theta}{\tau} = \frac{\ln\left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H\right) + \ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0}}{\ln\left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H\right)} = 1 + \frac{\ln \frac{T_{H1}^0}{T_{H2}^0}}{\ln\left(1 - \frac{T_{H2}^0 - T_{H1}^0}{P_H} \sigma_H\right)}. \quad (2.16)$$

Як видно з останньої рівності, відношення $\frac{\theta}{\tau}$ залежить тільки від параметрів нагрівача.

З нерівності (2.2) знайдемо:

$$kP_H \leq \langle \hat{P} \rangle < (k+1)P_H, \quad (2.17)$$

отже, $\langle \hat{P} \rangle \cong kP_H$. Висловивши звідси $k = \frac{\langle \hat{P} \rangle}{P_H}$ і підставляючи це значення в критерії стійкості (2.15) інтелектуальної мережі прямого електричного опалення, отримаємо перше обмеження на допустиму величину середньої потужності локального нагрівача:

$$\frac{P_H}{\langle \hat{P} \rangle} < \frac{\theta}{n\tau}. \quad (2.18)$$

Друге обмеження обумовлено необхідністю підтримувати опалення кожної зони опалювального об'єкта навіть при найменшому значенні ліміту потужності $\hat{P} = \hat{P}_{\text{inf}}$:

$$\frac{P_H}{\langle \hat{P} \rangle} \leq \frac{\hat{P}_{\text{inf}}}{\langle \hat{P} \rangle}. \quad (2.19)$$

В контексті понять теорії СМО введемо наступні позначення станів мережі прямого електричного опалення: s_0 – відключені всі нагрівачі, s_1 – включений 1 нагрівач, інші відключені, s_2 – включено 2 нагрівача, інші відключені, ..., s_i – включено i нагрівачів, інші відключені, ..., s_k – включено k

нагрівачів, черги немає, ..., s_{k+r} – включено k нагрівачів, в черзі на включення r нагрівачів.

Граничний розподіл ймовірностей станів обчислюється за відомими формулами теорії масового обслуговування:

$$p_0 = \left[1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{k+1}}{k \cdot k!} \cdot \frac{1}{1-\chi} \right]^{-1}; \quad (2.20)$$

$$p_i = \frac{\rho^i}{i!} \cdot p_0, \quad i \in (1, \dots, k); \quad (2.21)$$

$$p_{k+r} = \frac{\rho^{k+r}}{k^r \cdot k!} \cdot p_0, \quad r \geq 1. \quad (2.22)$$

Середня кількість нагрівачів \bar{r} , в черзі на включення:

$$\bar{r} = \frac{\rho^{k+1}}{k \cdot k!} \cdot \frac{p_0}{(1-\chi)^2}. \quad (2.23)$$

Середній час \bar{t} очікування включення нагрівача:

$$\bar{t} = \frac{\bar{r}}{\lambda} = \frac{\rho^{k+1}}{\lambda \cdot k \cdot k!} \cdot \frac{p_0}{(1-\chi)^2}. \quad (2.24)$$

Задачею оптимізації інтелектуальної мережі прямого електричного опалення є вибір такої середньої потужності P_H локального нагрівача, при якій середня потужність (2.9), що віддається нагрівачем в зону опалення, з урахуванням обмежень (2.18) і (2.19) є максимальною:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{P}_H = P_H \cdot \frac{\tau}{\theta + \bar{t}} \rightarrow \max \\ P_H < \frac{\theta}{n\tau} \langle \hat{P} \rangle \\ P_H \leq \hat{P}_{\inf} \end{array} \right. \quad (2.25)$$

2.3 Приклад вирішення задачі оптимізації інтелектуальної мережі прямого електричного опалення

Як приклад застосування викладеного методу розглянемо задачу знаходження оптимальної середньої потужності локального нагрівача в мережі розумного прямого електричного опалення 3-х кімнатної квартири з наступними параметрами:

- кількість зон опалення $n = 4$;
- ліміт потужності, використовуваної для опалення, заданий в межах від 2 кВт до 4 кВт;
- нагрівачі, які можуть бути використано для опалення, мають однакову конструкцію, відрізняючись тільки потужністю нагрівального елемента;
- постійна часу нагріву нагрівача $\tau_H = \frac{C_H}{\sigma_H} = 17,3$ хвил.;
- коефіцієнт теплоотдачі нагрівача $\sigma_H = 16,7$ Вт/град.;
- коефіцієнт тепловтрат в зоні опалення $\sigma_R = 14$ Вт/град.;
- зовнішня температура $T^0 = -20^0 C$;
- температура в опалювальній зоні $T_R^0 = 20^0 C$;
- середній рівень ліміту потужності $\bar{P} = \frac{2+4}{2} = 3$ кВт.

Результати розрахунків наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Розрахунок параметрів інтелектуальної мережі прямого електричного опалення

Потужність нагрівача P_H , Вт	3000	1500	1000	750
Кількість нагрівачів k , які можуть бути включені одночасно	1	2	3	4
Час розігріву нагрівача, τ хвил.	0,79	1,61	2,48	3,39
Час охолодження нагрівача ϑ , хвил.	2,57	2,57	2,57	2,57
Потенційний період включень нагрівача θ , хвил.	3,36	4,18	5,05	5,96
Інтенсивність потоку обслуговування μ , 1/хвил.	1,27	0,621	0,403	-
Інтенсивність потоку заявок λ , 1/хвил.	0,298	0,478	0,594	-

Коефіцієнт завантаження мережі ρ	0,235	0,77	1,474	-
Критерій стійкості мережі χ	0,235<1	0,385<1	0,491<1	-
Імовірність відключення всіх нагрівачів p_0 до моменту приходу заявки	0,763	0,46	0,35	-
Середній час очікування включення нагрівача \bar{t} , хвил.	0,24	0,008	0,00039	0
Середній період включень нагрівача $\bar{\theta} = \theta + \bar{t}$, хвил.	3,6	4,188	5,0504	-
Середня потужність, що віддається нагрівачем в опалювальну зону \bar{P}_H , Вт	658,3	576,6	491,1	426,6

В результаті проведеного дослідження процесу розподілу електричної енергії в інтелектуальній мережі прямого електричного опалення, що розглядається як модель системи масового обслуговування, отримано нетривіальний результат. Всупереч інтуїтивного уявлення про те, що найбільша енергія обмеженою потужності віддається в опалювальні зони при одночасному підключенні всіх наявних електронагрівальних приладів, виявилось, що вибіркоче підключення лише частини нагрівачів, сумарна потужність яких еквівалентна ліміту потужності опалення, дозволяє отримати більший ефект. У розглянутому прикладі опалення 3-х кімнатної квартири при потужності нагрівачів 1500 Вт одночасно можуть включитися тільки два з 4-х нагрівача. Решта очікують у черзі на включення. При цьому середня потужність, що віддається в зони опалення, більш ніж на 35% перевершує середню потужність, яку можуть віддати чотири включених без очікування в черзі нагрівача еквівалентною потужністю по 750 Вт кожен.

Зважаючи на те, що мінімальне значення ліміту потужності 2000Вт, перший варіант з використанням нагрівачів потужністю 3000Вт не припустимо тому що в разі мінімального ліміту в жодній зоні теплового поля не буде дозволу на включення нагрівачів. Таким чином, оптимальним є другий варіант з використанням нагрівачів потужністю 1500 Вт.

Глава 3. Синергетичний підхід до побудови розумного теплового поля. Алгоритми самоорганізації інтелектуальної мережі прямого електричного опалення

А музыканты Персимфанса сидели совсем иначе. Струнные сидели, образуя полный круг (частично спиной к зрителям!), а духовые располагались в середине этого круга. Каждый музыкант видел каждого, ибо в Персимфансе каждый слушал каждого и всех, а все слушали каждого.

Варшавский В.И., Поспелов Д.А. «Оркестр играет без дирижёра: размышления об эволюции некоторых технических систем и управлении ими»

Концепція системи «розумне теплове поле» заснована на інтеграції розосереджених обчислювальних ресурсів в фізичні процеси перетворення електричної енергії в теплову та її розподілення між зонами опалювального об'єкта. Ця концепція базується на синергетичних принципах [15, 16]:

- поєднання в одному агрегаті компонент різної технічної природи (електронагрівальних, електротехнічних, обчислювальних), які адаптивно взаємодіють із зовнішнім середовищем як єдиний функціональний і конструктивний організм;
- самоорганізація інтелектуальної мережі прямого електричного опалення в процесі розподілення теплової енергії між зонами опалювального об'єкта;
- колективна поведінка інтелектуальних пристроїв – смартконів, які керують процесами включення та відключення джерел тепла – складових розумного теплового поля.

Самоорганізація розумного теплового поля полягає в тому, що смарткони, базуючись на інформації, яку кожен з них одержує від керованого ним джерела тепла та його оточення, а також на показники сумарного споживання електроенергії тепловим полем в цілому, самостійно приймають

рішення відносно включення або відключення керованих ними електронагрівальних пристроїв. Внаслідок такого колективного рішення інтелектуальна мережа прямого електричного опалення автоматично змінює свій склад, адаптуючись до поточного ліміту електричної потужності та заданого розподілу температур в опалювальних зонах.

Для описання шляху зміни стану об'єкта в залежності від його поточного стану та інформації отриманої ззовні використовується спеціальний математичний об'єкт – скінчений автомат [17]. Його особливістю є скінченність множини станів автомату. Поняття скінченного автомата використовується для математичного моделювання технічних приладів дискретної дії. В ролі такого приладу у складі розумного теплового поля виступає смарткон, що керує локальним джерелом тепла. Скінчений автомат – смарткон може знаходитись у стані відключення, або підключення джерела тепла до мережі живлення, а також у проміжних станах, пов'язаних з процесами прийняття рішення відносно зміни вказаних станів. Самоорганізація розумного теплового поля здійснюється за рахунок колективної поведінки цих автоматів. Концепція колективної поведінки надає розумному тепловому полю емерджентні властивості, характерні тим, що взаємодія множини скінчених автоматів з досить малою кількістю власних станів і простими правилами поведінки, породжує агрегат з великою кількістю станів, пов'язаних між собою складними правилами поведінки. Кіберфізична система, що базується на концепції колективної поведінки, нагадує складну емерджентну систему – мурашник, де роль її відносно простих складових – мурах відіграють кінцеві автомати – смарткони.

В даній главі розглядається модель безкоаліційної колективної поведінки автоматів при розподілу електричної потужності в розумному тепловому полі. Тобто, така модель, в якій автомати не об'єднуються в коаліційні групи, розігруючи право на користування ресурсом – електричною потужністю.

3.1 Загальні принципи колективної поведінки автоматів

В основі базових понять і моделей теорії колективної поведінки і управління лежить гіпотеза простоти, що висловлена М.Л. Цетліним: «будь яка досить складна поведінка складається із сукупності простих поведінкових актів» [18]. На цій гіпотезі побудовані автоматні моделі: автомат з лінійною тактикою М.Л. Цетліна [19], «довірливий» автомат В.І. Кризького, розроблена модель автомата – «обережний» автомат Крилова [20]. Були також розроблені: модель автомата зі змінною структурою, призначеного для функціонування в динамічних середовищах, та загальна концептуальна схема колективної поведінки автоматів, взаємодіючих з середовищем.

У роботах Гінзбурга, Крилова, Цетліна [21] було запропоновано мову і апарат моделювання – стохастичні автомати, за допомогою яких вдалося побудувати нормативні моделі прийняття рішень.

Стохастичний автомат – математична модель агента, який володіє пам'яттю про прийняті раніше рішення і здатного приймати рішення на підставі ймовірності виграшу при тій чи іншій дії.

Позначимо через n глибину пам'яті автомата. Сенс цього параметра полягає в наступному, чим більше n , тим більш інерційним є автомат, бо тим більша послідовність програшів змушує його до зміни дій. Інтуїтивно ясно, що, чим більше інерційність автомата, тим ближче він до того, щоб, вибравши найкращу в даному середовищі дію, продовжувати виконувати лише її. З ростом глибини пам'яті зростає доцільність поведінки автомата в стаціонарних середовищах. І, навпаки, при малому значенні n функціонування автомата більш схильне до дії програшів, які можуть перевести автомат в нову дію. Автоматний граф, який відображає таку тактику поведінки зображено на рис. 3.1. У стані $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ автомат виконує дію φ . У стані ψ_1, ψ_2, ψ_3 автомат виконує дію ψ . Якщо дія автомата відповідає стану випадкового середовища, він одержує виграш $s = 1$, і за цієї умови стається перехід далі в глиб стану, в якому знаходиться автомат. Якщо дія автомата не відповідає стану випадкового середовища, він

одержує програш $s = 0$. За цієї умови стається перехід в напрямку виходу із стану, в якому знаходиться автомат.

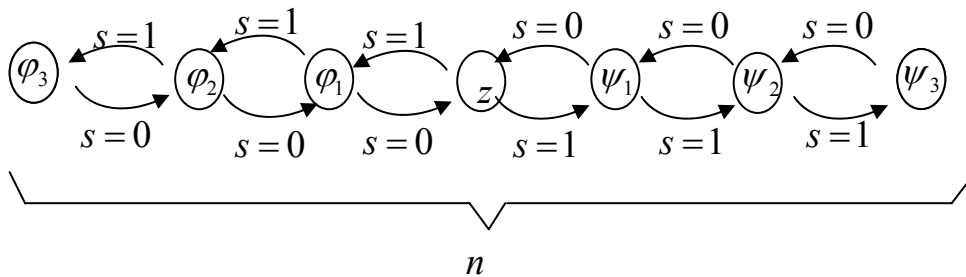


Рисунок 3.1 – Автомат з лінійною тактикою

Конструкція автомата, що подібна до розглянутої вище, була названа М.Л. Цетліним автоматом з лінійної тактикою [18]. Ця проста в технічній реалізації система вирішує складну задачу про доцільну поведінку в будь-якому заздалегідь не фіксованому стаціонарному середовищі. Тобто, прості конструкції, здатні виконувати процедури адаптації, що представляються на перший погляд досить складними. М.Л. Цетлін показав, що при зростанні величини n отримується послідовність автоматів з лінійною тактикою з усе дедалі більшою глибиною пам'яті, яка є асимптотично оптимальною. Це означає, що при $n \rightarrow \infty$ програш автомата стає мінімальним, який можна отримати в даному стаціонарному випадковому середовищі. Таким чином, у багатьох таких середовищах конструкція забезпечує при досить великих значеннях n поведінку, як завгодно близьку до найкращої.

В.Ю. Криловим [20] була запропонована схожа конструкція автомата, яка одержала назву «обережний автомат Крилова». На відміну від раніше розглянутих конструкцій цей автомат не детермінований, а імовірнісний. Влаштований він подібно до автомату з лінійної тактикою. При надходженні сигналу «виграш» зміна станів в ньому відбувається аналогічно автомату з лінійною тактикою, але при сигналі «програш» такий автомат не поспішає міняти стан. Він випадковим чином приймає рішення і або переходить в інший стан, або зберігає той стан, в якому автомат отримав сигнал «штраф».

В.Ю. Криловим була вперше розглянута однорідна гра багатьох однакових автоматів. Тим самим було відкрито новий напрям в застосуванні автоматних моделей: моделювання колективної поведінки за допомогою автоматів, асимптотично оптимальних в стаціонарному випадковому середовищі. Приклад колективної поведінки автоматів назвали грою в розміщення.

Граничний виграш залежить від величини обсягу пам'яті, як для безкоаліційної гри, так і для гри з однією фіксованою коаліцією, яка об'єднує автомати за принципом «загального доходу».

При всіх значеннях обсягу пам'яті граничний виграш кожного гравця, що входить в коаліцію більше, ніж граничний виграш індивідуалістів. З ростом обсягу пам'яті відмінності в граничному виграші автомата, включеного в коаліцію і автомата-індивідуаліста, ростуть.

Теорія колективної поведінки автоматів досліджує поведінку великих колективів автоматів з примітивними функціями. Поведінка автомата може розглядатися як недетермінована, що дозволяє будувати різні імовірнісні моделі. Допускається навчання автомата за допомогою штрафів і заохочень. Автомат може бути наділений пам'яттю, в якій він в деякій формі запам'ятовує попередні штрафи і заохочення, і може використовувати цю інформацію для поліпшення своєї та колективної поведінки відповідно до деякою функції доходу, тому є найбільш ефективною базою для побудови інтелектуальної мережі розподілення електричної енергії при прямому електричному опаленні приміщень. Задача, яка стоїть перед такою мережею відноситься до класу задач колективного розподілу ресурсу [22, 23].

Задача про розподіл ресурсу в її класичній постановці формулюється наступним чином.

Є ресурс в кількості R . В якості ресурсу можуть виступати сировина, обладнання, енергетичні, фінансові або людські ресурси, час і т.п. Є споживачі ресурсу в кількості N , для кожного з яких задана функція $\Psi_j(r_j)$ – ефект, який досягається j -м споживачем, коли кількість одержаного ним ресурсу дорівнює

r_j . Потрібно розділити ресурс між споживачами так, щоб максимізувати сумарний ефект, тобто потрібно знайти

$$\max \sum_{j=1}^N \Psi_j(r_j) \quad (3.1)$$

за умови

$$\sum_{j=1}^N r_j \leq R \quad (r_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N). \quad (3.2)$$

Рішення задачі про розподіл ресурсу має два аспекти: обчислювальний і управлінський. У разі, коли функції $\psi_j(r_j)$ відомі, виникає суто обчислювальна задача нелінійного програмування, ряд способів вирішення якої добре відомий. З іншого боку, якщо функції апріорно невідомі, а відомі лише їх поточні значення, при чому самі функції, як це часто буває на практиці, змінюються в часі, то виникає задача оперативного перерозподілу ресурсу в процесі функціонування системи, тобто задача управління.

З огляду на той факт, що рівняння системи є частковими похідними від функції Лагранжа, можна організувати децентралізовану поведінку в задачі про розподіл ресурсу, засновану на градієнтному методі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr_j}{dt} &= k_1 \left(\frac{d\Psi_j(r_j)}{dr_j} - \lambda \right), \\ \frac{d\lambda}{dt} &= k_2 (\sum_{j=1}^N r_j - R). \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Такий підхід [22] еквівалентний тому, що кожен споживач ресурсу максимізує свою локальну функцію користі виду

$$s_j = \Psi_j(r_j) - \lambda r_j. \quad (3.4)$$

В цьому випадку множник Лагранжа λ має сенс ціни на ресурс, яка формується центральним пристроєм по різниці між попитом і пропозицією.

Залежно від суми запитів ресурс розподіляється наступним чином. Якщо сума запитів не перевищує наявну кількість ресурсу, то запити задовольняються повністю. Якщо сума запитів перевищує наявну кількість ресурсу, то весь ресурс ділиться між споживачами пропорційно їхнім запитам, тобто

$$r_j = \begin{cases} x_j & \text{при } \sum_{j=1}^N x_j \leq R, \\ \frac{R x_j}{\sum_{j=1}^N x_j} & \text{при } \sum_{j=1}^N x_j > R, \end{cases} \quad (3.5)$$

де x_j – запит j -го споживача ресурсу.

У класичних дослідженнях моделей колективної поведінки при розподілі обмеженого ресурсу [22, 23, 24] увагу було приділено в основному таким задачам, в яких учасники розподілу могли скористатися будь-якою кількістю ресурсу в межах, заданих обмеженнями. Однак є чимала кількість задач, у тому числі ігрових [25, 26, 27, 28], де цей принцип не може бути застосовано, а учасникам розподілу доводиться керуватися принципом: «все або нічого». Саме такого роду задача має місце при розподілі лімітованої потужності між розосередженими нагрівальними приладами, кожен з яких може бути або підключеним до мережі живлення і споживати фіксовану потужність, або відключеним від мережі і не споживати нічого.

Якщо знайдене автоматами рішення задачі з обмеженнями типу «все або нічого» таке, що ресурс розподіляється весь без залишку, то це рішення, як показано в [25] оптимальне. Але у загальному випадку таке рішення не може бути одержано кінцевою кількістю автоматів. Тому ставиться задача досягнення рівноваги подібно до рівноваги Неша, коли залишок не розподіленого ресурсу (потужності) настільки малий, що не може бути використаний ніяким учасником розподілу.

Розглянемо в загальному вигляді задачу розподілу обмеженого ресурсу колективом автоматів, які керуються локальним принципом «все або нічого».

Нехай є деяка кількість m агентів – споживачів ресурсу. Кожен (i -ий) агент споживає в одиницю часу ресурс в кількості $w_i(t) \in \{(w_i > 0), 0\}$, де $w_i(t)$ – потужність споживання ресурсу. При цьому передбачається, що агенти не можуть виступати в якості регуляторів. Це означає, що для них згідно з принципом «все або нічого» є всього дві можливості. Або вони працюють, споживаючи при цьому ресурс з фіксованою потужністю $w_i > 0$, або припиняють роботу (відключаються $w_i = 0$). Економічні терміни та аналогії, які вживаються тут, являються суто умовними.

Якщо «власник» ресурсу має можливість забезпечити ресурсом всі об'єкти $W = \sum_{i=1}^m w_i$, то всі вони його використовують, отримуючи локальний ефект в розмірі $\psi_i = \psi(w_i)$, в іншому випадку коли $W < \sum_{i=1}^m w_i$ виникає проблема розподілу ресурсу лише між частиною агентів. При цьому відключені агенти зазнають збитків у розмірі $f_i = \psi_i - \lambda w_i \geq 0$, де λ – ціна ресурсу. Потрібно так підібрати склад групи агентів $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_m$, $\alpha_i \in \{0, 1\}$, щоб збиток, пов'язаний з відмовою від ресурсу

$$F = \sum_{i=1}^m (1 - \alpha_i) f_i \rightarrow \min \quad (3.6)$$

був мінімальним, а сумарна потужність не перевищувала встановленого ліміту

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i w_i \leq W(t), \quad (3.7)$$

де α_i – булева змінна, що приймає значення 1 або 0 в залежності від того, отримує чи ні i -ий об'єкт необхідну кількість ресурсу. Якщо величину допустимої потужності $W(t)$ припустимо вважати незмінною, то така задача відноситься до складу відомих задач дискретного програмування. Однак в реальних умовах ця величина змінюється випадковим чином, іноді досить істотно. В такому випадку маємо задачу управління. Звичайно, можна організувати централізоване управління всіма об'єктами. Для цього необхідно

передавати в «Центр управління» дані про потреби агентів в ресурсі. Отримавши ці дані, «Центр» приймає рішення про склад групи споживачів ресурсу. Треба сказати, що найбільш складною частиною даної задачі є організація збору та обробки інформації. Тому велика частина обчислювальної потужності системи, керуючої централізованим розподілом ресурсу, використовується для збору і обробки інформації, джерело якої знаходиться на периферії. Більш раціональною, з точки зору оптимізації інформаційного обміну та забезпечення надійності, є децентралізована інтелектуальна мережа, в якій розподілення ресурсу здійснюється завдяки її самоорганізації.

3.2 Принципи самоорганізації колективу автоматів, що розподіляють обмежений ресурс, користуючись локальним правилом поведінки «все, або нічого»

Структурна схема системи, що управляє розподілом ресурсу, показана на рис. 3.2.

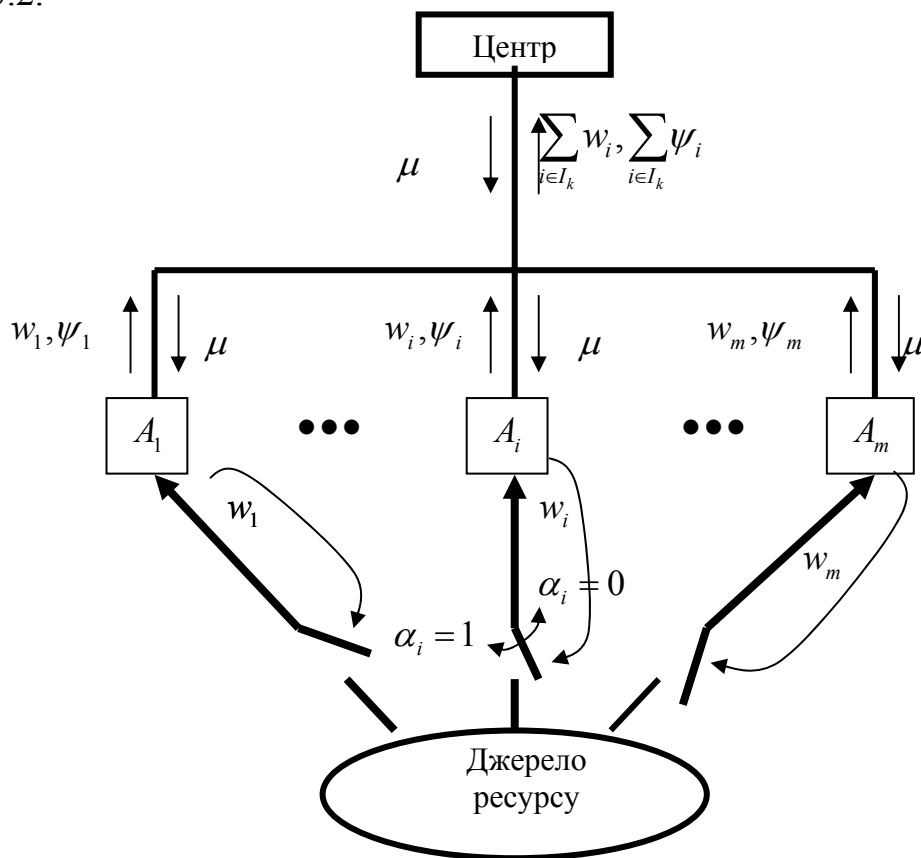


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи колективного розподілу ресурсу

Система включає джерело ресурсу, підключенням до якого керують автомати $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m$. Кожен i -ий автомат може підключити відповідного споживача до ресурсу ($\alpha_i = 1$) або зупинити надходження ресурсу ($\alpha_i = 0$). Для прийняття рішення автомати посилають в центр запити, в яких вказують необхідну кількість ресурсу w_i і очікувану ефективність від його використання ψ_i . Центр не диференціює запити автоматів. Для управління системою йому досить знати на кожному k -му кроці підготовки остаточного розподілу величину сумарного запитуваного ресурсу $\sum_{i \in I_k} w_i$ і сумарний ефект від його використання $\sum_{i \in I_k} \psi_i$. У своїй відповіді на запити автоматів центр повідомляє середню ціну ресурсу λ і ціну відмови від ресурсу μ . Виходячи з цих цін, необхідної кількості ресурсу w_i і очікуваного ефекту від його використання ψ_i кожен автомат визначає стратегію своєї поведінки.

Для того щоб рішення даного завдання могло з'явитися плодом колективної творчості автоматів необхідно забезпечити можливість альтернативного вибору стратегій поведінки кожним із них. Це означає, що споживач повинен отримувати вигоду не тільки від використання ресурсу, але і при відмові від нього. Порівнюючи свій виграш (програш) в тому і в іншому випадку, він повинен приймати рішення про вибір стратегії. Отже, відмова від ресурсу повинна оплачуватися. Нехай плата за відмову від ресурсу дорівнює C_i . Це означає, що центр, який розподіляє ресурс, повинен «виплачувати» компенсацію відключеним споживачам в розмірі $\sum_{i=1}^m (1 - \alpha_i) C_i$. При такій організації взаємних платежів за користування ресурсом і за відмову від нього кожен автомат приймає рішення на користь тієї чи іншої стратегії поведінки, керуючись простим правилом

$$\alpha'_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \psi_i - \lambda w_i > C_i, \\ 0, & \text{if } \psi_i - \lambda w_i < C_i. \end{cases} \quad (3.8)$$

Будемо вважати, що в разі рівності плати за відмову від ресурсу і ефекту від його використання рішення про вибір стратегії поведінки, прийняте автоматом, є випадковим. Після того як автомати зробили свій вибір, вони виставляють центру запити на ресурс. Останній перевіряє виконання обмеження (3.7). Нехай обмеження виконується. Якщо при цьому $\left| \sum_{i=1}^m \alpha'_i w_i - W \right| \leq \inf \{w_i\}$, то задача вирішена $\alpha_i = \alpha'_i$. В іншому випадку рішення про відмову від ресурсу прийняло занадто багато автоматів, внаслідок чого відпущений ліміт ресурсу недовикористовується, що не вигідно центру. Тому обрані стратегії підтверджуються тільки тим, хто прийняв рішення про використання ресурсу ($\alpha'_i = 1$). Тим же, хто прийняв рішення про відмову від ресурсу ($\alpha'_i = 0$), їх вибір не підтверджується. Перші вибувають з гри зі своїми порціями ресурсу, а другі продовжують розігрувати між собою ресурс, що залишився в кількості $W - \sum_{i=1}^m \alpha'_i w_i$. Якщо ж обмеження (3.7) не виконується, то це означає, що рішення про відмову від ресурсу прийняло занадто мало автоматів, внаслідок чого центр не в змозі задовольнити потребу в ресурсі. Тому обрані стратегії підтверджуються тільки тим, хто прийняв рішення про відмову від ресурсу ($\alpha'_i = 0$). Вони вибувають з гри. Решта автоматів продовжують розігрувати між собою ресурс в кількості W .

Така процедура прийняття незворотного рішення частиною учасників розподілу виправдана тим, що на наступних етапах їх вибір все одно вже не може змінитися. Дійсно, в першому випадку для того, щоб збільшити попит на ресурс, центр повинен буде зменшувати плату за відмову від нього. Тому нерівність $\psi_i - \lambda w_i > C_i$ буде виконуватися на наступних етапах розіграшу для тих, хто залишився підключеними до джерела ресурсу, незалежно від поведінки інших учасників. У другому випадку, для того, щоб зменшити попит на ресурс

центр повинен буде збільшити плату за відмову від нього. Тому нерівність $\psi_i - \lambda w_i < C_i$ залишиться незмінним на наступних етапах розіграшу для тих, хто прийняв рішення про відключення від джерела ресурсу.

Таким чином, прийняття рішення автоматами є багатокроковою процедурою. Необхідною умовою того, що вона закінчиться за кінцеве число кроків, є поділ на кожному (k -му) кроці множини учасників k -го етапу розіграшу на дві непустих підмножини. Якщо ця умова не виконується, в колективі автоматів може виникнути динамічна нестійкість. Суть її в тому, що всі автомати, вибравши одну і ту ж стратегію, не отримують її підтвердження, повертаються в гру і знову всі разом вибирають ту ж саму стратегію. Ситуація циклічно повторюється необмежену кількість разів. Динамічна нестійкість безнадійно затягує процедуру прийняття рішення, що суперечить інтересам центру - за обмежений час домогтися виконання обмеження (3.7). Для того щоб виключити можливість появи динамічної нестійкості центр повинен збалансувати суму можливих платежів за відмову від ресурсу і можливий сумарний ефект від його використання

$$\sum_{i \in I_k} \psi_i - \lambda \sum_{i \in I_k} w_i = \sum_{i \in I_k} C_i. \quad (3.9)$$

Дійсно, при виконанні (3.9) нерівності виду $\forall i \in I_k (\psi_i - \lambda w_i > C_i \vee \psi_i - \lambda w_i < C_i)$ виключаються. З (3.9) випливає правило формування центром плати за відмову від ресурсу. При цьому центр може застосовувати різні тактики:

1) «зрівнялівка» – всім учасникам розподілу призначається однакова плата незалежно від кількості ресурсу, який втрачає учасник $C_i = C = \sum_{i \in I_k} (\psi_i - \lambda w_i) / N_k$, де N_k - кількість учасників розіграшу на k -му кроці;

2) «лінійне заохочення» – плата за відмову від ресурсу пропорційна його кількості $C_i = \mu w_i$. В цьому випадку умови участі в розподілі і відмови від ресурсу набувають вигляду $(\psi_i > (\mu + \lambda) w_i, \psi_i < (\mu + \lambda) w_i)$.

Об'єднану ціну ресурсу і відмови від нього знайдемо з (3.9), підставляючи значення $C_i = \mu w_i$

$$\lambda + \mu = \frac{\sum_{i \in I_k} \psi_i}{\sum_{i \in I_k} w_i}.$$

3) «нелінійне заохочення» – плата за відмову від ресурсу є нелінійною функцією його кількості.

Зрозуміло, що центр може вдатися і до інших більш складним тактик формування плати за відмову від ресурсу, проте аналіз відповідних моделей виходить за рамки даної роботи.

Оцінка алгоритму колективної поведінки автоматів при розподілу ресурсу з обмеженнями типу «все або нічого»

Від вибору центром тієї чи іншої тактики, взагалі кажучи, залежить, які споживачі скористаються розподіляється ресурсом. Наприклад, при «зрівнялівці» перевага надаватиметься тим, хто отримує вигоду від використання ресурсу, що перевищує її середнє значення по множині учасників розподілу. Однак при цьому питома ефективність $\varepsilon_i = \frac{\psi_i}{w_i}$ не береться до уваги.

При «нелінійному заохочення» перевага може віддаватися вузько певним категоріям споживачів, наприклад, вимагає деякої заданої кількості ресурсу, або з урахуванням інших факторів, від яких залежить плата за відмову від ресурсу.

Тактика «лінійного заохочення» віддає перевагу споживачам, які використовують ресурс з найбільшою питоною ефективністю

$$\frac{\psi_i}{w_i} - \lambda \geq \sum_{i \in I_k} \psi_i / \sum_{i \in I_k} w_i. \quad (3.10)$$

Розглянемо принцип побудови кінцевого автомата, що реалізує тактику «лінійного захоплення». Автоматний граф показаний на рис. 3.3.

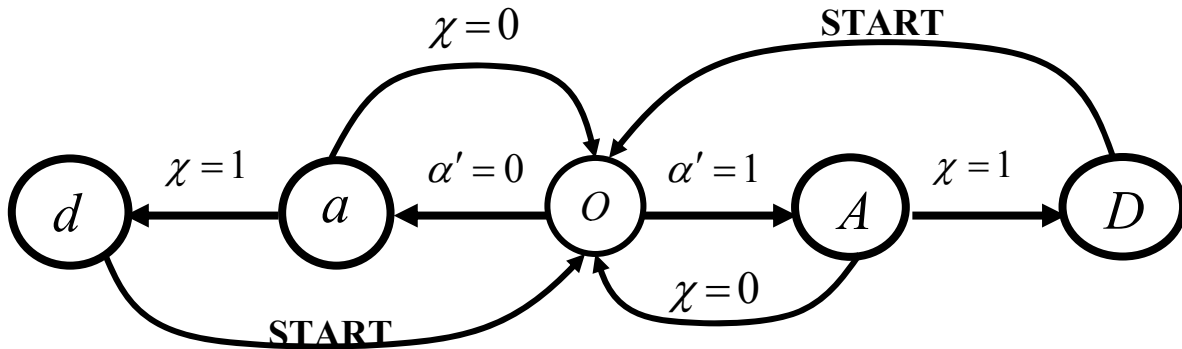


Рисунок 3.3 – Граф переходів автомата, в колективному розподіленні ресурсу

Стани автомата і відповідні їм дії описані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Стани автомата і відповідні їм дії

Стан		Дія
Позначення	Описання	
Q	Початковий стан	Формування та відправка запиту до Центру
a	Попереднє рішення про відмову від ресурсу	відсутнє
A	Попереднє рішення про одержання ресурсу	Формування та відправка запиту до Центру
d	Остаточне рішення про відмову від ресурсу	Відключення від джерела ресурсу, $\alpha = 0$
D	Остаточне рішення про одержання ресурсу	Підключення до джерела ресурсу, $\alpha = 1$

Поведінка автомата задається наступним алгоритмом.

1. Початкова ініціалізація (перехід в стан Q) здійснюється командою **START**, яка подається центром на все автомати.
2. У цьому стані автомат надсилає запит до Центру (w_i, ψ_i).
3. Центр повертає автоматом об'єднану ціну ресурсу і відмови від нього $\lambda + \mu$.

4. Якщо $\alpha'_i = 0$ відповідно до (3.8), то автомат переходить в стан a (попереднє рішення про відмову від ресурсу).

5. Якщо $\alpha'_i = 1$ відповідно до (3.8), то автомат переходить в стан A (попереднє рішення про використання ресурсу) і посилає в Центр запит.

6. Отримавши всі запити, Центр обчислює і повертає автоматом вектор підтвердження стратегій

$$[\beta, \gamma] = \begin{cases} 1,1 & \text{if } \inf \{w_i\} \geq W - \sum \alpha_i w_i \geq 0, \\ 0,0 & \text{if } \inf \{w_i\} < W - \sum \alpha_i w_i \geq 0, \\ 0,1 & \text{if } W - \sum \alpha_i w_i < 0. \end{cases}$$

7. Автомат обчислює умову переходу χ_i

$$\chi_i = \beta \vee (\alpha'_i \oplus \gamma).$$

Якщо $\chi_i = 1$, то попередньо обрана стратегія підтверджується, і автомат переходить в остаточний стан (d або D). Якщо $\chi_i = 0$, то попередньо обрана стратегія не підтверджується, автомат повертається в початковий стан, виконується п.2.

Для того щоб отримати асимптотичну оцінку тактики «лінійного захоплення» з точки зору поставленої задачі (мінімізація шкоди, що завдається обмеженням ресурсу), розглянемо випадок, коли кінцеве кількість ресурсу W розподіляється настільки великою кількістю автоматів, що залишок ресурсу прагне до нуля незалежно від того, які споживачі отримують ресурс, а які будуть відключені від джерела ресурсу.

$$\inf \{w_i\} \geq W - \sum \alpha_i w_i \rightarrow 0. \quad (3.11)$$

Ресурс розподіляється без залишку. Для характеристики ефективності використання ресурсу споживачами введемо в розгляд параметр $\varepsilon_i = \frac{\psi_i}{w_i}$ –

питому ефективність використання ресурсу. Впорядкуємо споживачів по критерію зменшення ε_i і поставимо у відповідність множині значень ε_i функцію $\varepsilon(W_j)$, де W_j – сума порцій ресурсу w_i , на які претендують автомати з більшими ніж у j -го автомата значеннями ε_i . З огляду на розглянутий

$$\text{граничний випадок, маємо } \psi(W_j) = \sum_{i=0}^j \varepsilon_i w_i \rightarrow \int_0^{W_j} \varepsilon(W) dW.$$

При цьому, так як ресурс розподіляється без залишку, маємо

$$\psi(W_0) = \int_0^{W_0} \varepsilon(W) dW, \quad (3.12)$$

де W_0 – кількість ресурсу, яка дістається тим споживачам, у яких $\varepsilon_i \geq \varepsilon(W_0)$.

Впорядкування споживачів за величиною параметра ε_i показано на рис. 3.4.

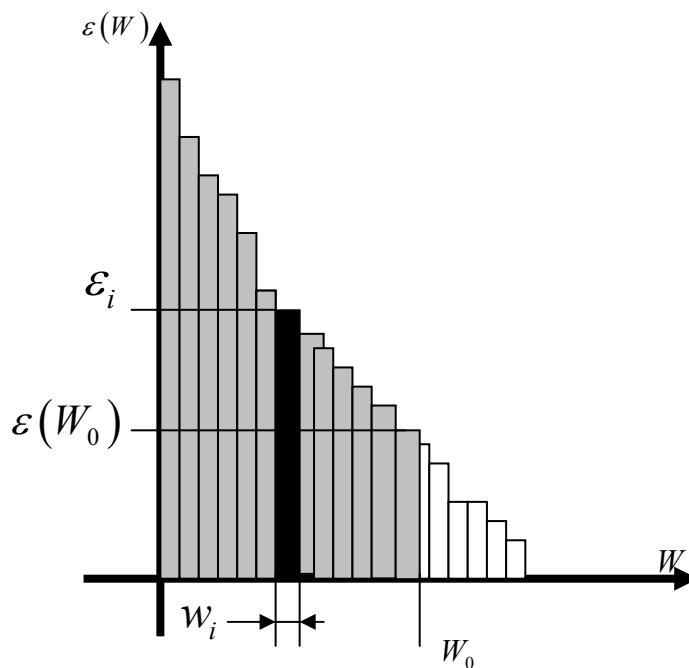


Рисунок 3.4 – Розподілення ресурсу між споживачами з параметром $\varepsilon_i \geq \varepsilon(W_0)$ (виділено сірим кольором)

Збиток від обмеження ресурсу мінімізується за умови $\psi(W_0) = \max$.

Доведемо, що відбір в групу, яка одержує ресурс, споживачів з параметром $\varepsilon_i \geq \varepsilon(W_0)$ забезпечує мінімізацію збитку.

$$F = \int_{W_0}^{\bar{W}} \varepsilon(W) dW - \lambda(\bar{W} - W_0) = \sum_{i=1}^m \psi_i - \int_0^{W_0} \varepsilon(W) dW - \lambda(\bar{W} - W_0) \rightarrow \min.$$

Тут W_0 є порцією ресурсу, на яку претендують автомати, $\bar{W} = \sum_{i=1}^m w_i$ – найбільша кількість ресурсу, яке може бути використане всіма споживачами. Очевидно, що $\min\{F\} = \max\{\psi(W_0)\}$ якщо ціна ресурсу λ в ході розподілу не змінюється. Для доказу досить будь-яким чином спробувати змінити порядок на безлічі учасників розподілу, тобто замінити частину споживачів, включених в групу, яка одержує ресурс, тими, які в цю групу не потрапили. При цьому на проміжку значень аргументу $[0, W_0]$ функція $\varepsilon'(W)$, відповідна новому порядку, буде менше найбільшої функції $\varepsilon(W)$. Приклад такої заміни показаний на рис. 3.5.

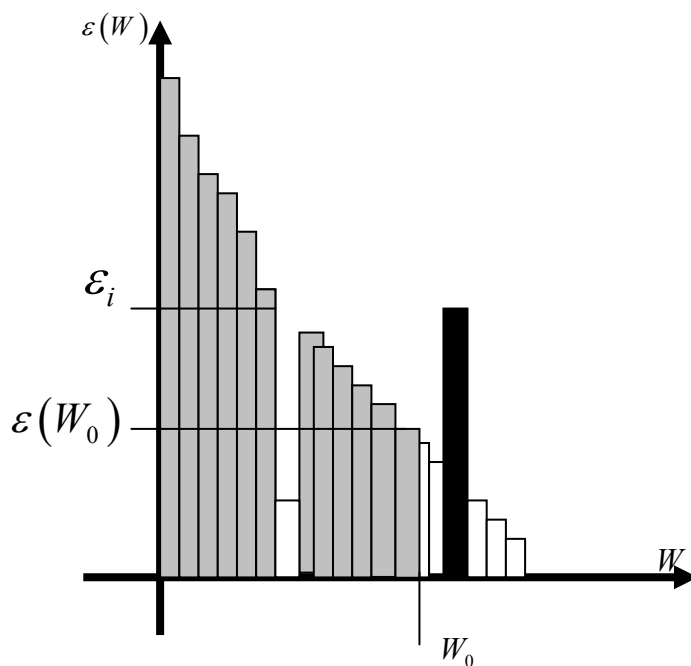


Рисунок 3.5 – Порушення принципу $\varepsilon_i \geq \varepsilon(W_0)$ при розподіленні ресурсу

Так як нас цікавить асимптотична оцінка за умови (3.11), то будь-яка подібна перестановка призведе до того, що отриманий в результаті цієї

перестановки інтеграл буде менше вихідного $\psi'(W_0) = \int_0^{W_0} \varepsilon'(W) dW \leq \psi_{\max}$. Отже, відбір в групу, яка одержує ресурс, за критерієм $\varepsilon_i \geq \varepsilon(W_0)$ забезпечує асимптотичну мінімізацію збитку, що й треба було довести.

Поведінка автоматів, що визначається умовою (3.10), задовольняє вказаному критерію асимптотичного мінімуму шкоди. Це означає, що ефективність описаного вище алгоритму розподілу буде тим вище, чим більша кількість споживачів бере участь в розподілі ресурсу.

При кінцевому числі учасників розподіл, що досягається в результаті самоорганізації автоматів, може виявитися не оптимальним, так як обмеження (3.7) виконується у вигляді нерівності. Модуль відхилення реально досяжного ефекту від використання ресурсу $\bar{\psi}_{\max}$ від теоретичного максимуму задовольняє нерівності

$$|\bar{\psi}_{\max} - \psi_{\max}| \leq \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i w_i \right) \left(W_0 - \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i \right). \quad (3.13)$$

Так як, $\psi_{\max} \geq \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i w_i \right) \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i$ то, розділивши ліву частину нерівності (3.13) на величину ψ_{\max} , а праву частину на $\varepsilon \left(\sum_{i=1}^m \alpha_i w_i \right) \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i$, отримаємо оцінку зверху відносного відхилення δ реально досяжного ефекту від гранично

досяжного максимуму $\delta = \frac{|\bar{\psi}_{\max} - \psi_{\max}|}{\psi_{\max}} \leq \frac{W_0 - \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i}{\sum_{i=1}^m \alpha_i w_i}$.

Якщо ця оцінка перевищує деяке, наперед задане значення, наприклад, 1%, то Центр може спробувати поліпшити рішення, змінивши тактику формування плати за відмову від ресурсу, наприклад, здійснюючи метаігровий синтез [27].

Характерною особливістю розглянутої вище задачі є незмінна ціна ресурсу λ . Це означає, що плата за відмову від ресурсу здійснюється з коштів

його власника, як в грі з плюсовою сумою. Якщо ж плата за відмову від ресурсу здійснюється з коштів споживачів, яким достався ресурс, як в грі з нульовою сумою, то ціна ресурсу повинна бути змінною. Розглянемо правило формування ціни ресурсу в цьому випадку. Сумарна плата за відмову від ресурсу становить

$$\bar{\sigma} = \mu \sum_{i=1}^m (1 - \alpha_i) w_i. \quad (3.14)$$

Додаткові «кошти для виплати цієї суми» можуть бути отримані за рахунок збільшеної ціни ресурсу λ' . Збільшення повинно бути таким, щоб виконувалася рівність

$$(\lambda' - \lambda) \sum_{i=1}^m \alpha_i w_i = \bar{\sigma}. \quad (3.15)$$

З цього рівняння, з урахуванням (3.14) отримаємо.

$$\lambda' = \mu \frac{\sum_{i=1}^m (1 - \alpha_i) w_i}{\sum_{i=1}^m \alpha_i w_i} + \lambda. \quad (3.16)$$

Якщо при розподілі з плюсовою сумою стійкість рішення забезпечувалася рівновагою (3.9) і при цьому асимптотично оптимальне рішення досягалося не більше ніж за m кроків, то в разі розподілу з нульовою сумою внаслідок (3.16) усталеність не гарантується рівновагою (3.9).

Висновки

1. Колектив кінцевих автоматів, які реалізують найпростіші тактики поведінки, забезпечує асимптотично оптимальне рішення задачі розподілу ресурсу з обмеженнями типу «все або нічого».

2. Якщо знайдене автоматами рішення таке, що ресурс розподіляється весь без залишку, то це рішення оптимально у всіх відносинах, а не тільки асимптотично.

3. У поведінці даної системи кінцевих автоматів слід розрізняти дві істотно відмінні стратегії - розподіл ресурсу з плюсовою і нульовою сумою. У першому випадку автомати завжди приходять до угоди за кінцеве число кроків, що не перевищує кількості що у розподілі автоматів. У другому випадку стійкість системи не гарантується. Потрібні додаткові дослідження динаміки колективної поведінки і знаходження оптимальних алгоритмів колективного розподілу ресурсу.

3.3 Алгоритм самоорганізації розумної мережі прямого електричного опалення

Функціональна схема мережі представлена на рис. 3.6. Роль «власника ресурсу» в цій мережі відіграє мережевий контролер. В його пам'яті зберігається величина граничної потужності мережі живлення контрольованого об'єкту W_0 . Поточна потужність мережі живлення контрольованого об'єкту $\tilde{W}(t)$ вимірюється інтелектуальним сенсором потужності у складі мережевого контролера. Лімітована поточна потужність, яка може бути використана на опалення за рахунок підключення до мережі живлення додаткових опалювальних пристроїв, обчислюється як різниця

$$W(t) = W_0 - \tilde{W}(t). \quad (3.17)$$

При розробці алгоритму поведінки автоматів, які розподіляють потужність між нагрівачами, враховується допущення відносно того, що за період часу, коли автомати приймають рішення, величина лімітованої потужності $W(t)$ суттєво не змінюється.

Роль агентів, які приймають участь у розподіленні ресурсу (потужності) відіграють смарткони. До їх складу входять кінцеві автомати, які забезпечують цілеспрямовану самоорганізацію інтелектуальної мережі опалювальних пристроїв, а також інтелектуальні сенсори потужності нагрівачів w_i .

Коли в мережі живлення присутній надлишок потужності $W(t) \geq \inf \{w_i\}$, смарткони, обмінюючись інформацією з мережевим контролером вирішують

задачу підключення до мережі живлення додаткових електронагрівачів. Підключені опалювальні пристрої управляються у двохпозиційному режимі вбудованими в них термостатами. Коли в мережі живлення з'являється дефіцит потужності $W(t) < 0$ смарткони, обмінюючись інформацією з мережевим контролером, вирішують задачу відключення від мережі живлення частини електронагрівачів. Величина потужності електронагрівача визначається автоматично шляхом вимірювання вбудованим у смарткон інтелектуальним сенсором потужності нагрівача.

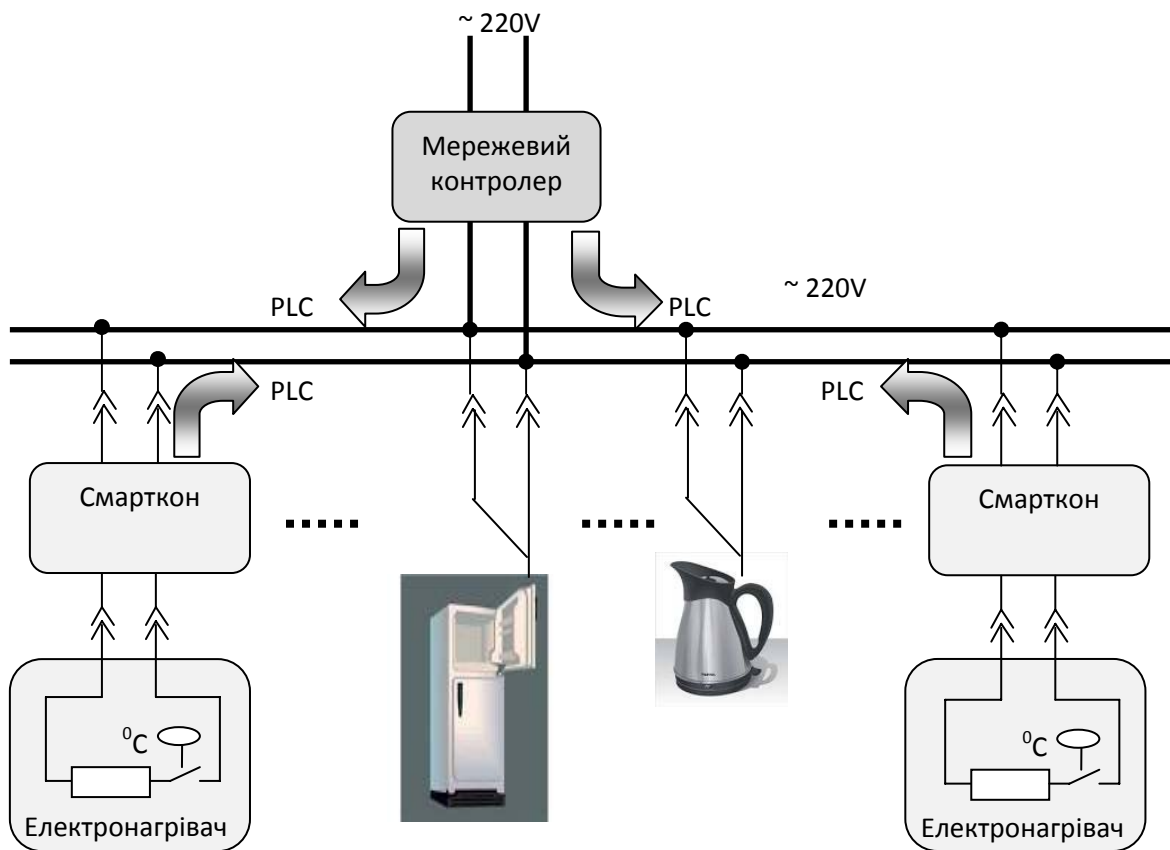


Рисунок 3.6 – Функціональна схема інтелектуальної мережі прямого електричного опалення

Нехай в даний момент часу t в системі є доступний ресурс (резерв невикористаної потужності) в кількості $W(t)$. Підключенням нагрівальних пристроїв керують автомати $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m$.

Стан i -го автомата будемо позначати α_i . Кожен i -ий автомат може підключити відповідного споживача до ресурсу ($\alpha_i = 1$) або відключити від

ресурсу ($\alpha_i = 0$). Для прийняття рішення автомати посилають в центр запити, в яких вказують необхідну кількість ресурсу w_i і свій рівень пріоритету ψ_i (пропоновану плату за ресурс). Центр не диференціює запити автоматів. Для управління системою йому досить знати на кожному k -му кроці підготовки остаточного розподілу величину сумарного запитуваного ресурсу $\sum_{i \in I_k} w_i$ і сумарний ефект від його використання $\sum_{i \in I_k} \psi_i$. У своїй відповіді на запити автоматів центр повідомляє всім учасникам розподілу середньозважену ціну ресурсу λ . Кожен автомат приймає для себе попереднє рішення

$$\alpha'_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \psi_i \geq \lambda w_i, \text{ connect,} \\ 0 & \text{if } \psi_i < \lambda w_i, \text{ disconnect.} \end{cases} \quad (3.18)$$

Після того як автомати зробили свій попередній вибір, ті з них, які прийняли рішення про підключення «своїх» нагрівачів, вдруге виставляють центру запити на ресурс. Останній перевіряє виконання обмеження

$$\sum_{i \in I_k} w_i \leq W. \quad (3.19)$$

Нехай обмеження виконується. Якщо при цьому $\left| \sum_{i=1}^m \alpha'_i w_i - W \right| \leq \inf \{w_i\}$, то задача вирішена. Остаточне рішення автоматів співпадає з попереднім $\alpha_i = \alpha'_i$. В іншому випадку рішення про відмову від ресурсу прийняло занадто багато автоматів, внаслідок чого відпущений ліміт ресурсу недовикористовується, що не вигідно центру. Тому обрані стратегії підтверджуються тільки тим, хто прийняв рішення про використання ресурсу ($\alpha'_i = 1$). Тим же, хто прийняв рішення про відмову від ресурсу ($\alpha'_i = 0$), їх вибір не підтверджується. Перші вибувають з гри зі своїми порціями ресурсу, а другі продовжують розігрувати між собою ресурс, що залишився в кількості $W - \sum_{i=1}^m \alpha'_i w_i$. Якщо ж обмеження

(3.19) не виконується, то це означає, що рішення про відмову від ресурсу прийняло занадто мало автоматів, внаслідок чого центр не в змозі задовольнити потребу в ресурсі. Тому обрані стратегії підтверджуються тільки тим, хто прийняв рішення про відмову від ресурсу ($\alpha'_i = 0$). Вони вибувають з гри. Решта автоматів продовжують розігрувати між собою ресурс в кількості $W(t)$. Така процедура прийняття незворотного рішення частиною учасників розподілу виправдана тим, що на наступних етапах їх вибір все одно вже не може змінитися. Дійсно, в першому випадку для того, щоб збільшити попит на ресурс, центр повинен буде зменшувати плату за нього. Тому нерівність $\psi_i - \lambda w_i > 0$ буде виконуватися на наступних етапах розіграшу для тих, хто залишився підключеними до джерела ресурсу, незалежно від поведінки інших учасників. У другому випадку, для того, щоб зменшити попит на ресурс центр повинен буде збільшити плату за нього. Тому нерівність $\psi_i - \lambda w_i < 0$ залишиться незмінною на наступних етапах розіграшу для тих, хто прийняв рішення про відключення від джерела ресурсу.

Таким чином, прийняття рішення автоматами є багатокрокова процедура. Необхідною умовою того, що вона закінчиться за кінцеве число кроків, є поділ на кожному (k -му) кроці множини I_k учасників k -го етапу розіграшу на дві непустих підмножини (рис. 3.7).

Якщо ця умова не виконується, в колективі автоматів може виникнути динамічна нестійкість. Суть її в тому, що всі автомати, вибравши одну і ту ж стратегію, не отримують її підтвердження, повертаються в гру і знову всі разом вибирають ту ж стратегію. Ситуація циклічно повторюється необмежену кількість разів. Динамічна нестійкість безнадійно затягує процедуру прийняття рішення. Для того щоб виключити можливість появи динамічної нестійкості центр повинен збалансувати суму можливих платежів за ресурс з сумою запропонованих платежів

$$\sum_{i \in I_k} \psi_i - \lambda \sum_{i \in I_k} w_i = 0. \quad (3.20)$$

Дійсно, при виконанні (2.6) нерівності виду $\forall i \in I_k ((\psi_i - \lambda w_i > 0) \vee (\psi_i - \lambda w_i < 0))$ виключаються. Звідси отримуємо середньозважену ціну ресурсу.

$$\lambda = \frac{\sum_{i \in I_k} \psi_i}{\sum_{i \in I_k} w_i}. \quad (3.21)$$

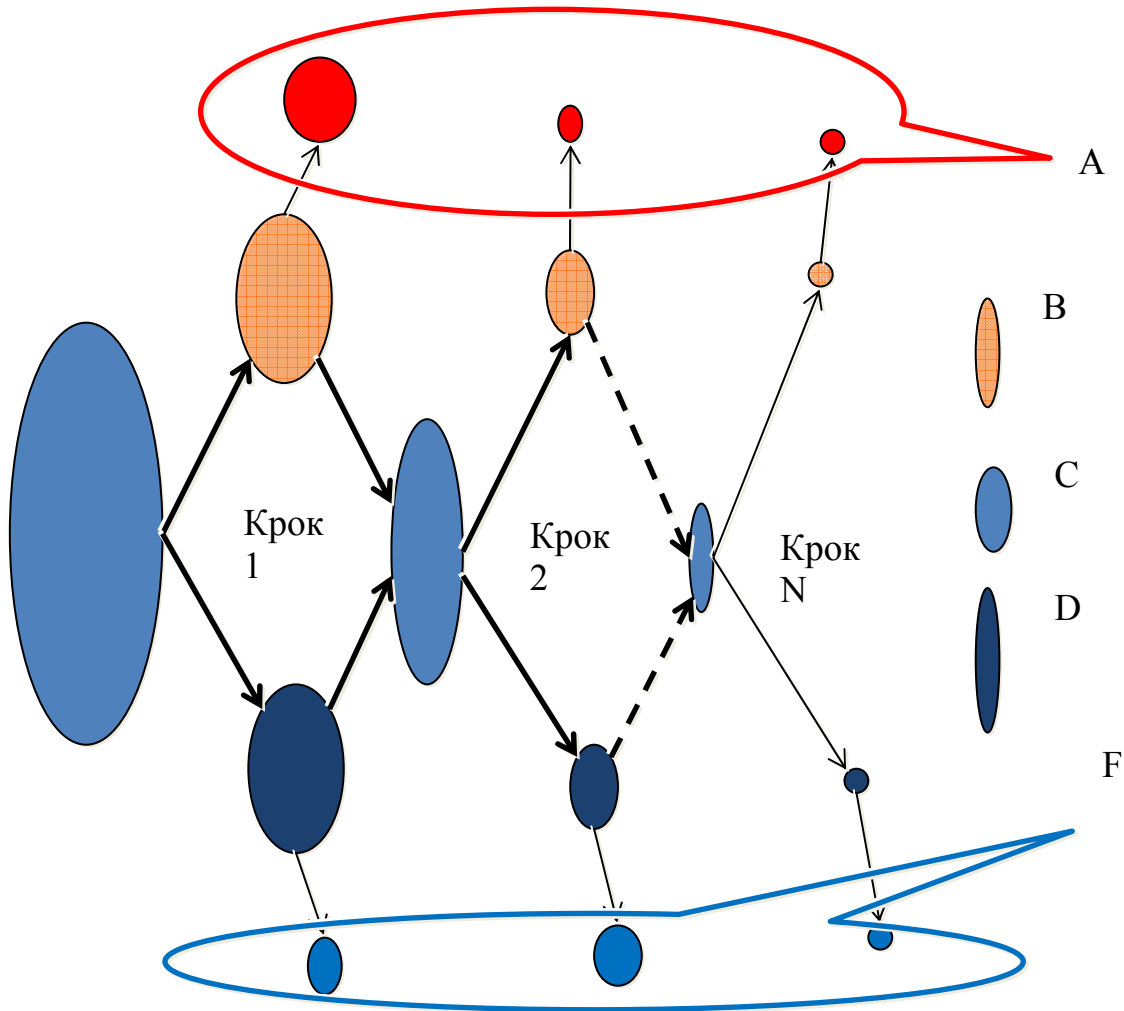


Рисунок 3.7 – Процес декомпозиції множини нагрівачів на включені та відключені

A – підмножина автоматів, які прийняли остаточне рішення про включення своїх нагрівачів, B – підмножина автоматів, які прийняли попереднє рішення про включення своїх нагрівачів, C – підмножина автоматів, які ще не визначились з рішенням, D – підмножина автоматів, які прийняли попереднє рішення на відключення, E – підмножина автоматів, які прийняли остаточне рішення про відключення своїх нагрівачів

Алгоритм поведінки автоматів, які керують локальними джерелами тепла розумного теплового поля.

Позначення сигналів

W^* – поточна потужність об'єкту опалення,

W_{\max} – ліміт потужності об'єкту опалення,

Un – вказівник знаку дисбалансу електропостачання,

H_i – стан нагрівача: $H_i = 1$ – включено, $H_i = 0$ – відключено,

w_i – потужність нагрівача,

LW – кількість наявного ресурсу,

T_i^* – поточна температура в зоні дії нагрівача,

T_i – задана температура в зоні дії нагрівача,

λ_i – початковий пріоритет локального джерела тепла,

λ_i^* – поточний пріоритет локального джерела тепла,

$\langle \lambda^* \rangle$ – середній рівень поточного пріоритету,

a_i – запит ресурсу ($a_i = 1$, якщо автомат приймає рішення запитати ресурс),

Λ – ціна ресурсу,

D – залишок ресурсу після задоволення всіх запитів,

t – проміжок поточного часу, відлік якого починається з моменту відключення нагрівача,

T – константа, що визначає темп наростання поточного пріоритету,

b_i – рішення про участь у торгах ($b_i = 1$, якщо автомат приймає рішення брати участь).

1. Вимірювання поточної потужності W^* об'єкту опалення.

2. Визначення дисбалансу електропостачання $\Delta W = W_{\max} - W^*$.

$$UN = \begin{cases} 0, & \Delta W < 0 \\ 1, & \Delta W \geq 0 \end{cases}$$

3. Опитування сенсорів. Одержуємо:

$H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_n$

$w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n$

$T_1^*, T_2^*, \dots, T_i^*, \dots, T_n^*$

$KT_k, \dots, KT_i, \dots, KT_j$, для тих нагрівачів, які відключено (КТ-блок – контакт термостату. КТ=1 – блок – контакт замкнутий, КТ=0 – блок – контакт розімкнутий).

4. Визначення потужності, яка може бути використана опалювальними пристроями

$$LW = \begin{cases} \Delta W, & Un = 1 \\ \sum_1^n H_i w_i + \Delta W, & Un = 0 \end{cases}$$

5. Визначення поточних пріоритетів розподілення тепла у опалювальному об'єкті

$$\lambda_1^* = \frac{\frac{T_1}{T_1^*}}{\sum_1^n \frac{T_1}{T_1^*}} \cdot \left(1 + \frac{t}{\tau}\right); t = \begin{cases} 1+t, & H_1 = 0 \\ 0, & H_1 = 1 \end{cases}$$

.....

$$\lambda_n^* = \frac{\frac{T_n}{T_n^*}}{\sum_1^n \frac{T_n}{T_n^*}} \cdot \left(1 + \frac{t}{\tau}\right); t = \begin{cases} 1+t, & H_n = 0 \\ 0, & H_n = 1 \end{cases}$$

6. Рішення про участь у торгах за ресурс ($b_i = 1$, якщо автомат приймає рішення брати участь)

$$b_1 = UN \oplus H_1 \& KT_1$$

.....

$$b_n = UN \oplus H_n \& KT_n$$

7. Встановлення початкового стану тригера, що керує нагрівачем ($C_i = 10$ – включити нагрівач; $C_i = 01$ – відключити нагрівач; $C_i = 00$ – не змінювати стан нагрівача) $C_1 = 00, \dots, C_n = 00$.

8. Початкова ціна ресурсу $\Lambda = \langle \lambda^* \rangle = \frac{\sum_1^n \lambda_i^*}{n}$.

9. Запит ресурсу ($a_i = 1$, якщо автомат приймає рішення запитати ресурс)

$$a_1 = \begin{cases} 1, & (\lambda_1^* \geq \Lambda) \& (b_1 = 1) \& (C_1 = 00) \\ 0, & (\lambda_1^* < \Lambda) \vee (b_1 = 0) \end{cases}$$

.....

$$a_n = \begin{cases} 1, & (\lambda_n^* \geq \Lambda) \& (b_n = 1) \& (C_n = 00) \\ 0, & (\lambda_n^* < \Lambda) \vee (b_n = 0) \end{cases}$$

10. Визначення поточного залишку ресурсу $D = LW - \sum_1^n a_i w_i$.

11. Приймання рішення ($C_i = 10$ – включити нагрівач; $C_i = 01$ – відключити нагрівач; $C_i = 00$ – не міняти стан нагрівача).

- Якщо контакт термостату розімкнутий (КТ=0), то $C_1 = 01$.
 - Якщо контакт термостату замкнутий (КТ=1) і $C_1 = 10$.
 - Якщо $D \geq 0$ та $a_1 = 1$, то $C_1 = 10$.
 - Якщо $D \geq 0$ та $a_1 = 0$, то очікування нового значення Λ , $C_1 = 00$.
 - Якщо $D < 0$ та $a_1 = 0$, то $C_1 = 01$
 - Якщо $D < 0$ та $a_1 = 1$, то очікування нового значення Λ , $C_1 = 00$
-
- Якщо контакт термостату розімкнутий (КТ=0), то $C_n = 01$.
 - Якщо контакт термостату замкнутий (КТ=1) і $C_n = 10$.
 - Якщо $D \geq 0$ та $a_n = 1$, то $C_n = 10$.
 - Якщо $D \geq 0$ та $a_n = 0$, то очікування нового значення Λ , $C_n = 00$.
 - Якщо $D < 0$ та $a_n = 0$, то $C_n = 01$.
 - Якщо $D < 0$ та $a_n = 1$, то очікування нового значення Λ , $C_n = 00$.

12. $\left\{ \begin{array}{l} \forall i (C_i \neq 00). \longrightarrow \boxed{1} \\ \text{Якщо тільки для одного значення } \exists k (C_k = 00) \text{ і } UN = 0, \\ \text{то } C_k = 01. \longrightarrow \boxed{1} \\ \text{Якщо тільки для одного значення } \exists k (C_k = 00) \text{ і } UN = 1. \\ \text{Якщо більш ніж для одного значення } \exists j (C_j = 00). \longrightarrow \boxed{13} \end{array} \right.$

13. Запит ресурсу ($a_i = 1$)

$$a_1 = \begin{cases} 1, & (\lambda_1^* \geq \Lambda) \& (b_1 = 1) \& (C_1 = 00) \\ 0, & (\lambda_1^* < \Lambda) \vee (b_1 = 0) \end{cases}$$

.....

$$a_n = \begin{cases} 1, & (\lambda_n^* \geq \Lambda) \& (b_n = 1) \& (C_n = 00) \\ 0, & (\lambda_n^* < \Lambda) \vee (b_n = 0) \end{cases}$$

14. Визначення ціни ресурсу $\Lambda = \frac{\sum_1^n a_i \lambda_i^* w_i}{\sum_1^n a_i w_i} \longrightarrow \boxed{10}$

Відмінною особливістю даної системи є колективна поведінка її агентів, які спільно здійснюють розподіл ресурсу дискретними порціями, керуючись локальним правилом «все або нічого».

Процес самоорганізації системи підтримується динамічною зміною рівнів пріоритетів $\psi_i(t)$ (пропонованої плати за ресурс) автоматів, які беруть участь в розподілі потужності

$$\psi_i(t) = \begin{cases} \psi_{i0}, & t = 0, \text{ if } \alpha_i = 1, \\ \psi_{i0} + K(t), & \text{if } \alpha_i = 0, \end{cases} \quad (3.22)$$

де ψ_{i0} – початкова ставка i -го автомата в грі за отримання необхідної йому потужності, $K(t)$ – монотонно зростаюча в часі функція підвищення пріоритету автомата, який не одержав необхідний ресурс потужності.

Відлік часу починається з моменту відключення нагрівача.

Приклад процесу формування рангів пріоритету двох опалювальних пристроїв демонструється на рис. 3.8.

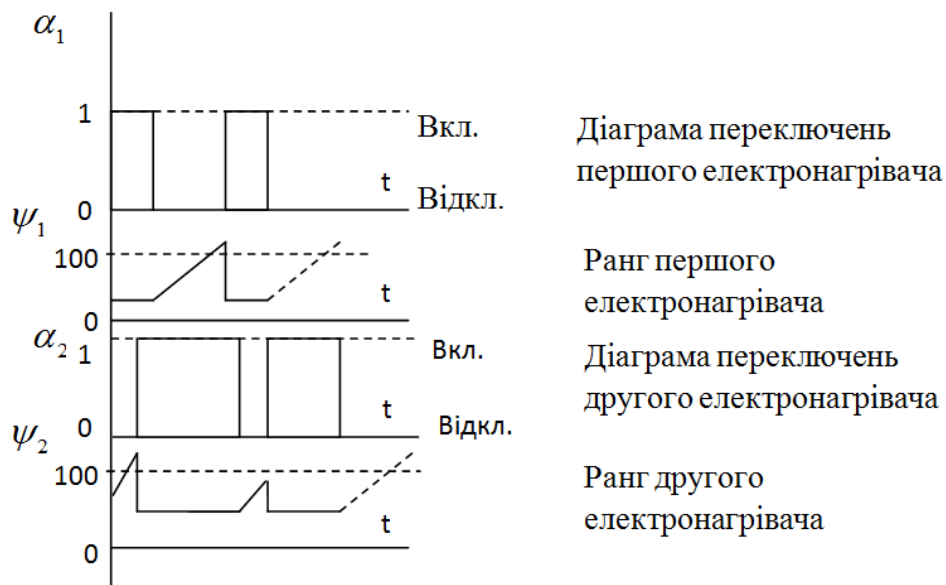


Рисунок 3.8 – Діаграми переключень та зміни рангів пріоритетів нагрівачів в інтелектуальній мережі опалювальних пристроїв

3.4 Принципи побудови (конструкція) кінцевого автомату, який використовується для колективного розподілу потужності між опалювальними пристроями

Як показано вище, збитки в колективі автоматів, які розігрують обмежений ресурс, керуючись локальним правилом «все або нічого», сягають мінімального значення лише коли наявний ресурс розподіляється без останку. При заданому розподілу потреб у ресурсі (w_1, w_2, \dots, w_m) , коли $\forall i (w_i > 0)$ такий варіант слід розглядати як випадковий, який не можна досягнути цілеспрямованою організацією поведінки автоматів. Тому перед автоматами смартконів ставиться задача досягти такої рівноваги в мережі опалювальних пристроїв, при якій нерозподілений останок потужності не може бути використаний ні одним з учасників розподілення (рівновага за Нешем).

Кінцевий автомат $\{X, \Phi, Y\}$, де X – множина вхідних сигналів, Y – множина вихідних сигналів, а Φ – множина станів автомату, має опис у вигляді

автоматного графу, який вказує взаємні переходи s_{ij} із стану $\varphi_i \in \Phi$ до стану $\varphi_j \in \Phi$.

Автоматний граф для автомата, який у складі смарткона колективно з автоматами інших смартконів керує розподіленням потужності в мережі живлення опалювальних пристроїв, наведено на рис. 3.9. Цей автомат можна розглядати як результат об'єднання двох автоматів з лінійною тактикою з глибиною пам'яті $n = 5$ кожний. Тому такий автомат будемо називати автоматом з білінійною тактикою.

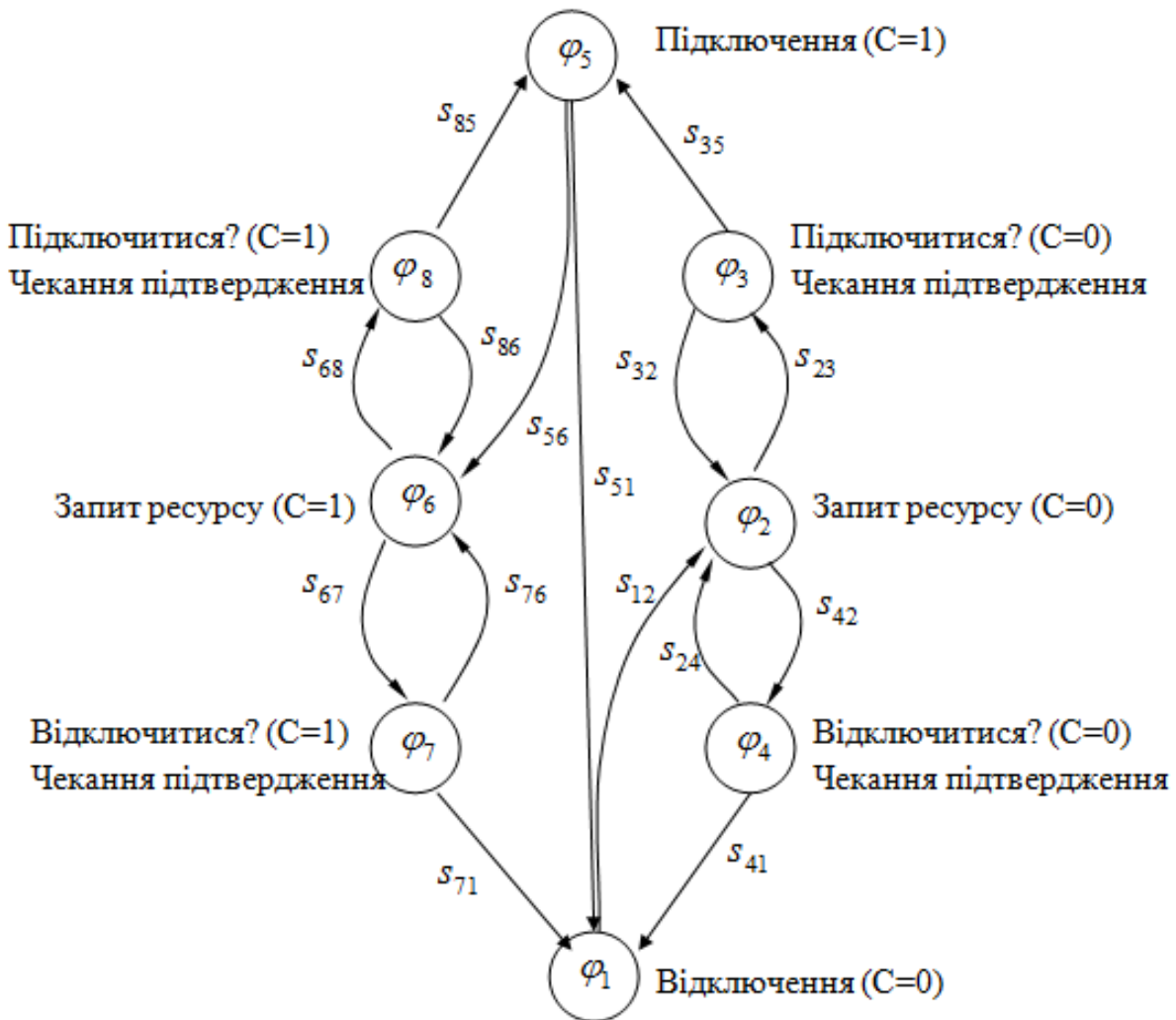


Рисунок 3.9 – Граф станів автомата з білінійною тактикою, призначеного для участі у колективному розподілу обмеженої потужності в мережі живлення опалювальних пристроїв

Попереднє рішення автомати приймають, керуючись правилом

$$\alpha'_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \psi_i \sum w_i \geq w_i \sum \psi_i, \text{ connect,} \\ 0 & \text{if } \psi_i \sum w_i < w_i \sum \psi_i, \text{ disconnect.} \end{cases}$$

Умови переходів:

$$[H = 0] \wedge [LW > w] \Rightarrow s_{12};$$

$$[H = 1] \wedge [Un = 1] \Rightarrow s_{56};$$

$$([Un = 1] \wedge [W = w]) \vee [H = 0] \Rightarrow s_{51};$$

$$A = \begin{cases} 1, & \text{if } [\psi \sum w_i \geq w \sum \psi_i] \wedge [D = 1] \wedge \overline{([Un = 1] \wedge [W = w])}, \\ 0, & \text{if } [\psi \sum w_i < w \sum \psi_i] \vee [D = 0] \vee ([Un = 1] \wedge [W = w]), \end{cases}$$

$$[A = 1] \Rightarrow s_{23};$$

$$[A = 1] \Rightarrow s_{68};$$

$$[A = 0] \Rightarrow s_{24};$$

$$[A = 0] \Rightarrow s_{67};$$

$$([B = 1] \vee [G \oplus A = 1]) \Rightarrow s_{35};$$

$$([B = 1] \vee [G \oplus A = 1]) \Rightarrow s_{85};$$

$$([B = 1] \vee [G \oplus A = 1]) \Rightarrow s_{41};$$

$$([B = 1] \vee [G \oplus A = 1]) \Rightarrow s_{71};$$

$$([B = 0] \wedge [G \oplus A = 0]) \Rightarrow s_{32};$$

$$([B = 0] \wedge [G \oplus A = 0]) \Rightarrow s_{42};$$

$$([B = 0] \wedge [G \oplus A = 0]) \Rightarrow s_{86};$$

$$([B = 0] \wedge [G \oplus A = 0]) \Rightarrow s_{76}.$$

Функції виходів:

$$C = \begin{cases} 1, & \text{if } (\varphi = \varphi_5) \vee (\varphi = \varphi_6) \vee (\varphi = \varphi_7) \vee (\varphi = \varphi_8) \\ 0, & \text{if } (\varphi = \varphi_1) \vee (\varphi = \varphi_2) \vee (\varphi = \varphi_3) \vee (\varphi = \varphi_4) \end{cases}$$

$$Aw = \begin{cases} D \cdot w, & \text{if } (\varphi = \varphi_2) \vee (\varphi = \varphi_6) \\ A \cdot D \cdot w, & \text{if } (\varphi = \varphi_3) \vee (\varphi = \varphi_4) \vee (\varphi = \varphi_7) \vee (\varphi = \varphi_8) \end{cases}$$

$$D = \begin{cases} 1, & \text{if } LW > w \\ 0, & \text{if } LW \leq w \end{cases}$$

$$F = \begin{cases} 1, & \text{if } LW < w \\ 0, & \text{if } LW \geq w \end{cases}$$

$$PSI = Pri \cdot \left(1 + \frac{t}{T}\right), t = \begin{cases} 0, & \text{if } C = 1 \\ t + \Delta t, & \text{if } C = 0 \end{cases}, T = const.$$

3.5 Імітаційне моделювання процесу самоорганізації розумного теплового поля

Для дослідження алгоритмів самоорганізації розумного теплового поля, а також аналізу техніко-економічної перспективи «розумного» прямого електроопалення приміщень розроблено імітаційну модель. Модель дозволяє досліджувати автоматичний розподіл температур та потужності в розумному тепловому полі в процесі його самоорганізації внаслідок колективної поведінки автоматів, які керують підключенням потужності до розосереджених джерел тепла. Розподіл температур моделюється системою балансних диференціальних рівнянь (1.1, ..., 1.3), що описують потоки тепла між нагрівальними приладами, які обігрівають зони, а також між зонами обігріву та навколишнім середовищем.

В якості об'єкту моделювання обрано трикімнатну квартиру на першому поверсі багатоповерхового будинку (рис. 3.10). Підлога квартири контактує з підвалом, який не отоплюється. Стеля контактує з аналогічною квартирою другого поверху. Згідно плану квартира має три вікна габаритними розмірами

1,4 x 1,6 м та одне вікно 2,0 x 1,6 м. Вхідні двері виконано з полотна масиву сосни товщиною $B = 0,05$ м з утеплювачем.

Габаритні розміри дверей 0,8 x 2 м. Вихід з дому веде не відразу на вулицю, а до під'їзду, тому в розрахунку тепловтрат застосовано понижуючий коефіцієнт 0,7.

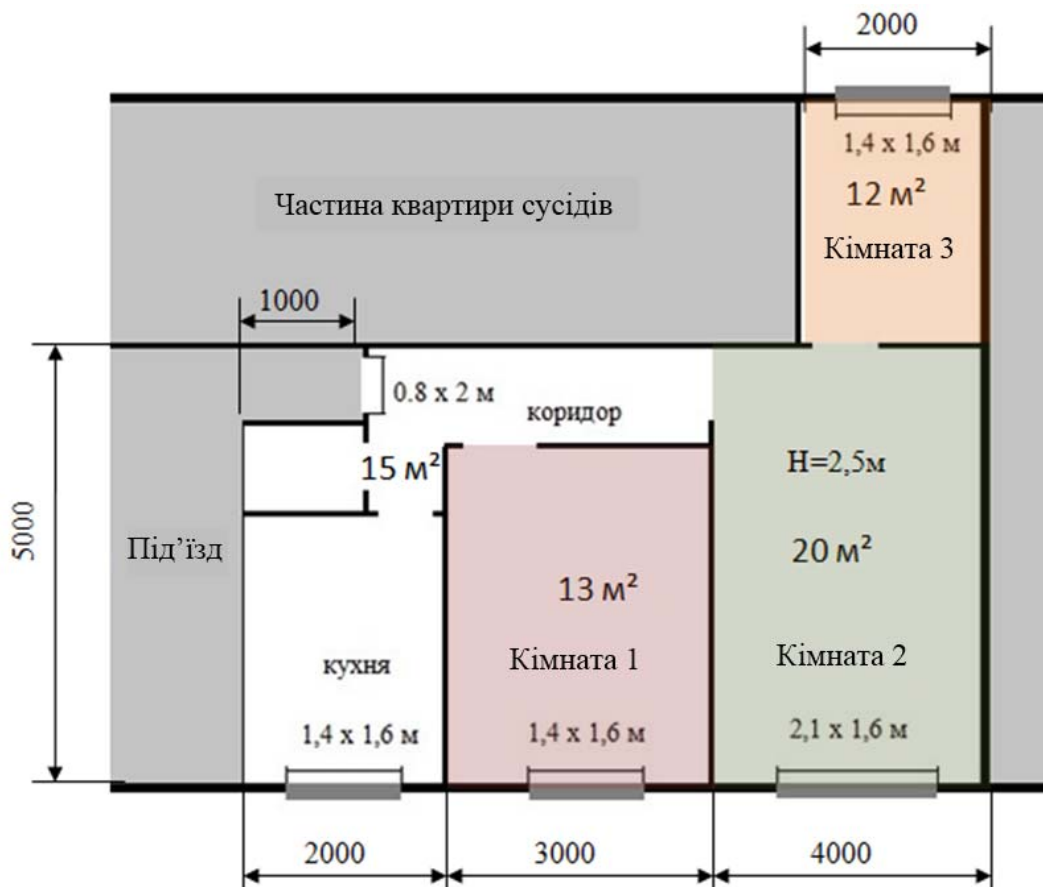


Рисунок 3.10 – План квартири – об'єкта моделювання теплових процесів

Всі чотири вікна виконані з трикамерного профілю ПВХ і мають двокамерні склопакети 4-16-4-16-4 зі звичайним склом (4 – товщина скла, мм, 16 – відстань між стеклами, мм).

Технологічну схему моделі з вказівкою місць розташування джерел тепла, та теплових втрат наведено на рис. 3.11.

На рис. 3.11 позначено:



Потік теплових втрат.



70Вт

Потужність додаткового потоку тепла від джерел (крім нагрівача) в зоні обігріву.



1500Вт

Потужність нагрівача.



Смарткон.



Розетка електричної мережі живлення.



Мережевий контролер.

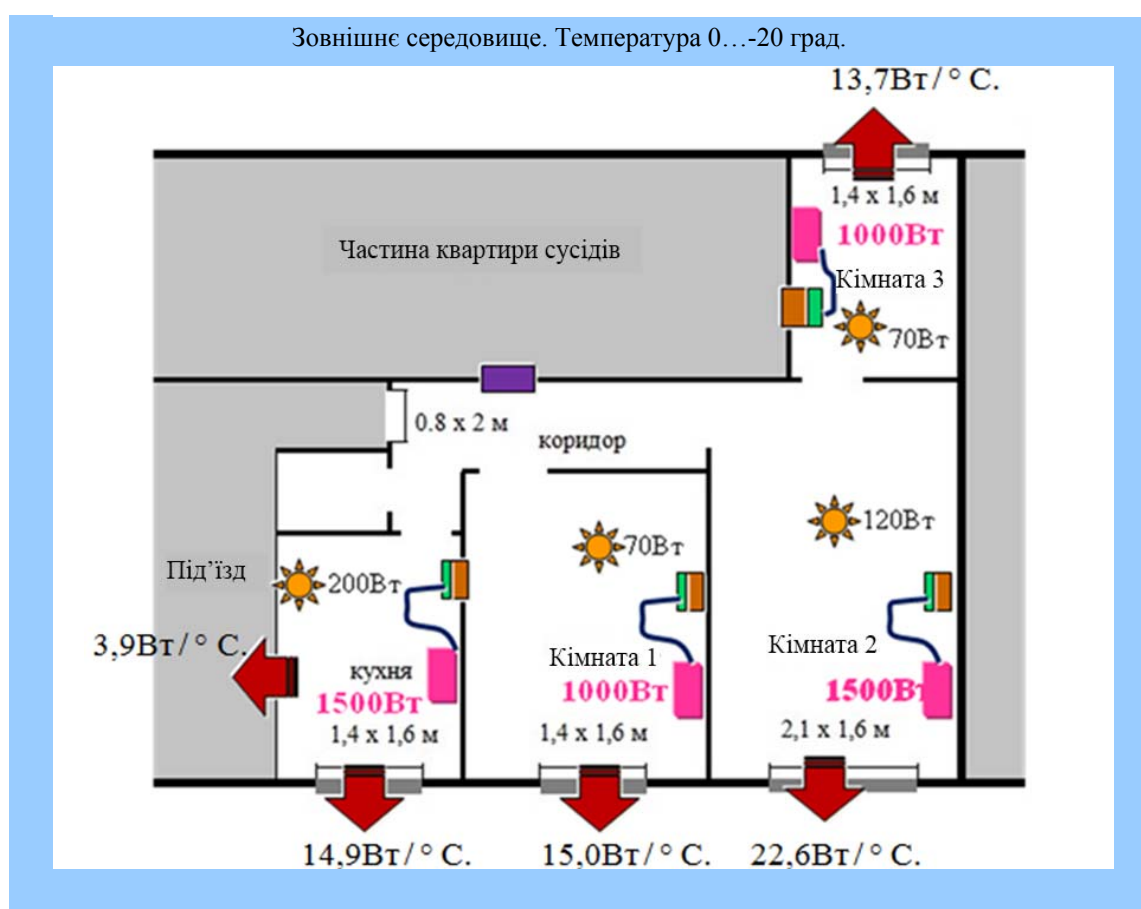


Рисунок 3.11 – Технологічна схема моделі об'єкту прямого електричного опалення

3.5.1 Імітаційна модель розумного теплового поля та її складові

Характерною відзнакою системи, що моделюється, є децентралізований принцип прийняття рішень відносно користування лімітованою потужністю автоматами – учасниками її розподілу, які керують нагрівачами. За цим принципом вихідні сигнали Центра – координатора розподілу потужності не

диференційовані відносно автоматів – учасників розподілу. Кожен з цих вихідних сигналів роздається на входи всіх автоматів – учасників розподілу, які приймають рішення відносно користування лімітованою потужністю.

У зв'язку з цим система колективного розподілу потужності між нагрівачами має шинну архітектуру, як показано на рис. 3.12.

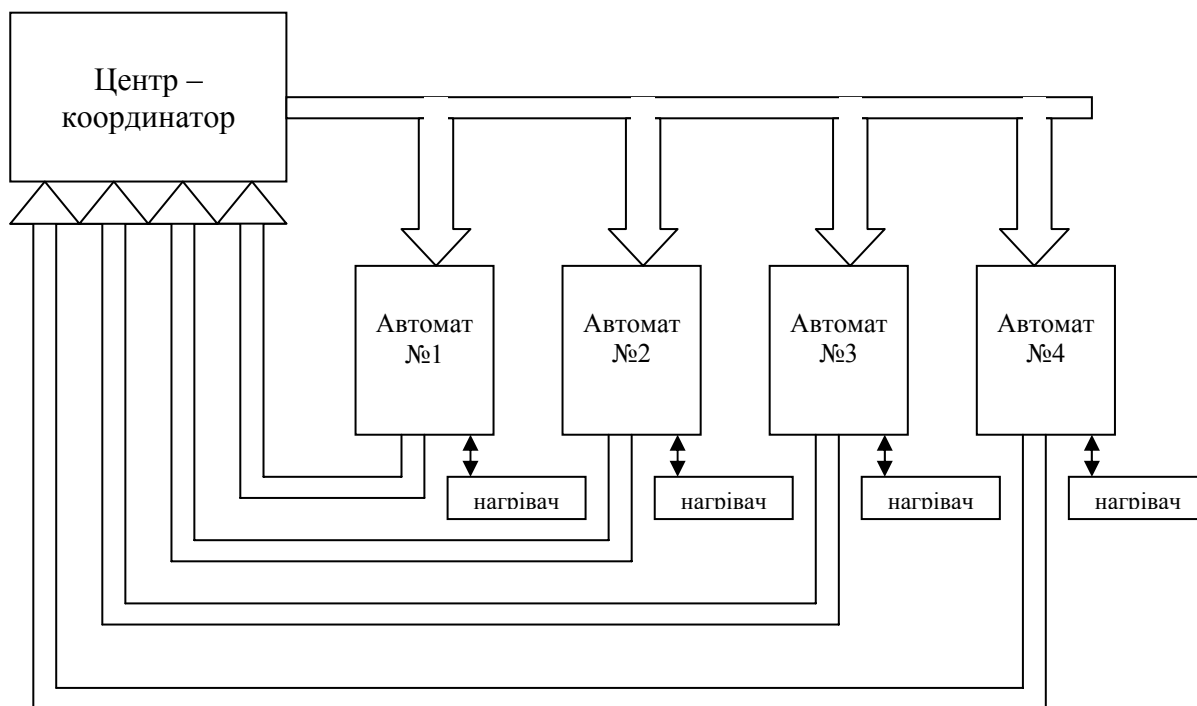


Рисунок 3.12 – Структурна схема моделі розумного теплового поля

Моделювання здійснено в програмному середовищі Simulink. Функціонально-блочна діаграма (ФБД) моделі зони опалення показана на рис. 3.13.

Вхідний сигнал моделі: $P_h(t)$ – потужність нагрівача.

Вихідні сигнали: $T_h(t)$ – температура поверхні нагрівача, $T_R(t)$ – температура повітря в зоні опалення.

Позначення на ФБД: Sh – тепловий потік від опалювального пристрою, Sr – тепловий потік між зоною опалення і зовнішнім середовищем, Pr – потужність додаткового потоку тепла від джерел (крім нагрівача) в зоні опалення, th – постійна часу нагрівача, tr – постійна часу нагріву повітря в зоні опалення.

ФБД моделі термостата показана на рис. 3.14.

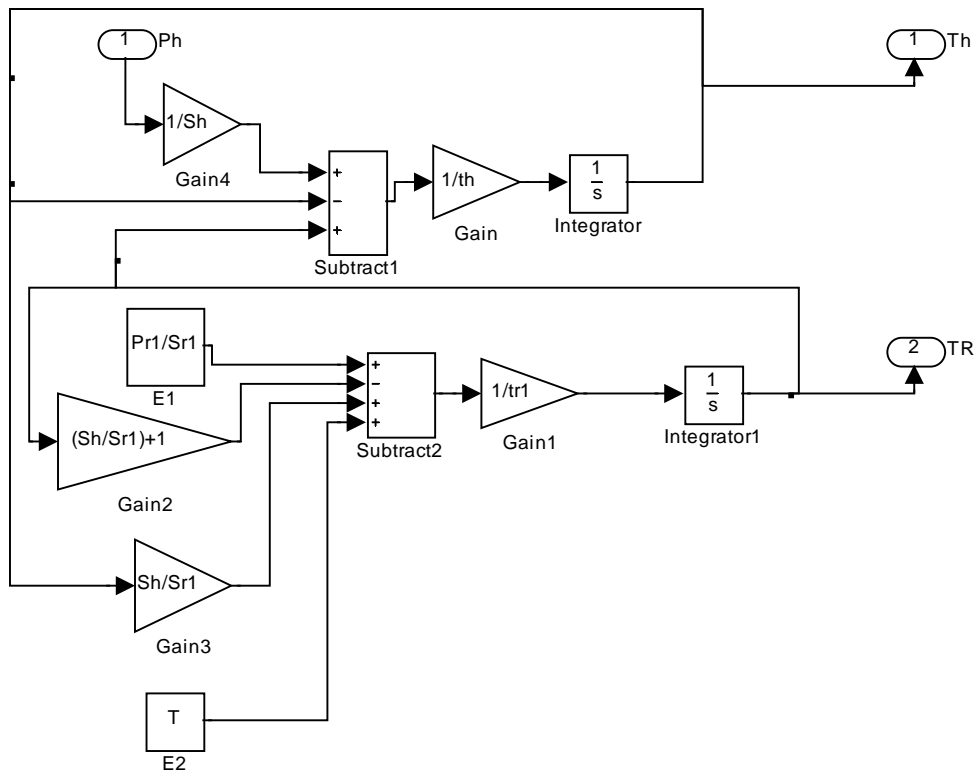


Рисунок 3.13 – Функціонально-блочна діаграма моделі зони опалення

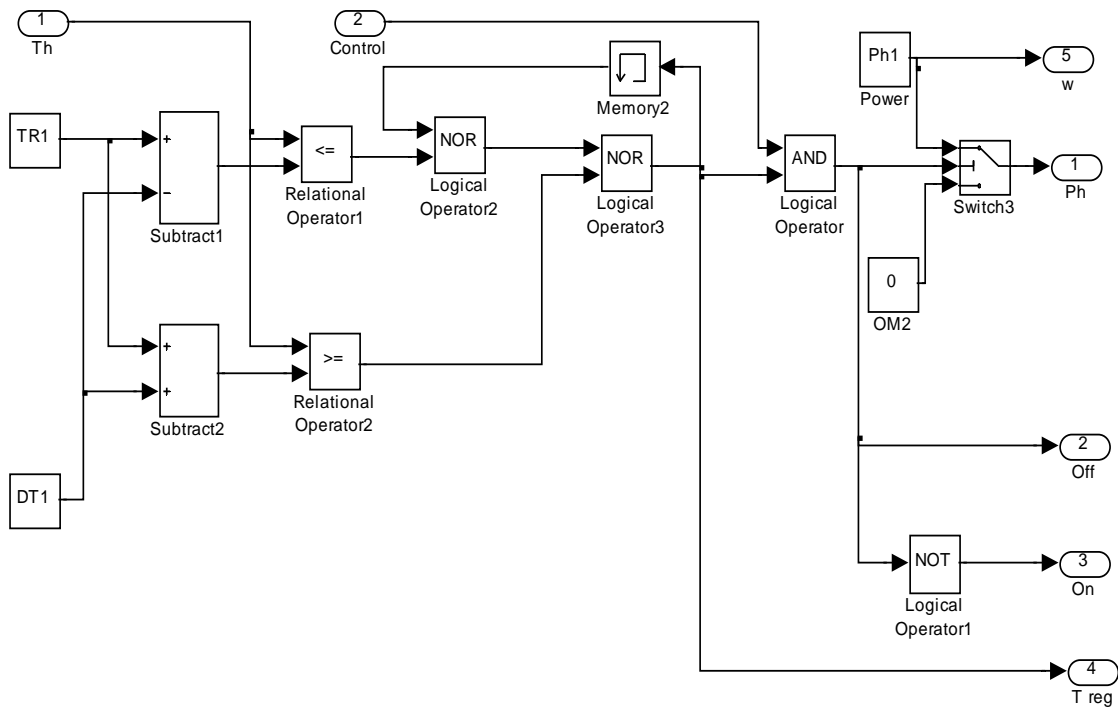


Рисунок 3.14 – Функціонально-блочна діаграма моделі термостату

Опис вхідних, вихідних сигналів та констант моделі термостату наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вхідні, вихідні сигнали та константи моделі

Вхідні сигнали	Вихідні сигнали	Константи
Th (1) – температура нагрівача. Control (2) – сигнал дозволу включення електроопалювального приладу	W (5) – номінальна потужність нагрівача. Ph – поточна потужність нагрівача, як функція часу. Off – включити електроопалювальний прилад On – відключити електроопалювальний прилад Treg – стан реле термостату (1 – вкл., 0 – відкл.)	TR – уставка температури нагрівача (середнє значення) DT – модуль допустимого відхилення температури нагрівача від заданої уставки Ph – номінальна потужність нагрівача

ФБД моделі автомата показана на рис. 3.15. Опис вхідних, вихідних сигналів та перелік підсистем моделі наведено у табл. 3.3. ФБД підсистем показані на рис. 3.16...3.20.

Таблиця 3.3 – Вхідні, вихідні сигнали та підсистеми моделі

Вхідні сигнали	Вихідні сигнали	Перелік підсистем
Off (1) – Включити електроопалювальний прилад. On (2) – Відключити електроопалювальний прилад. Treg (10) – Стан реле термостату (1 – вкл., 0 – відкл.). Unloading (3) – розгрузка мережі живлення. L-W(4) – невикористаний залишок потужності. Beta (5) – залишок потужності менше, ніж мінімальна потреба за умовою, що він більше нуля. Gamma (6) – залишок потужності менше, ніж мінімальна потреба. W control (7) – підсумковий запит потужності в мережі електроопалювальних пристроїв. Price (8) – середньозважена ціна ресурсу (потужності) W (9) – номінальна потужність нагрівача Pr-i (11) – рівень пріоритету	Control (1) – дозвіл на включення електроопалювального пристрою Alfa*w (2) – запит ресурсу (потужності) L-W>w (3) – залишок потужності більше необхідної для даного нагрівача L-W<w (4) – залишок потужності менше необхідної для даного нагрівача Psi (5) – пропонована плата за ресурс	Start1 – підсистема формування команди підключення автомата до розподілу ресурсу. Subsystem1 – підсистема формування рівня пропонованої плати за ресурс з урахуванням рівня пріоритету нагрівача. Subsystem – підсистема формування рішення відносно участі автомата у використанні ресурсу (потужності). Trig – підсистема функції RS – триггер. delaylinePuls – підсистема функції «Лінія затримки імпульсна».

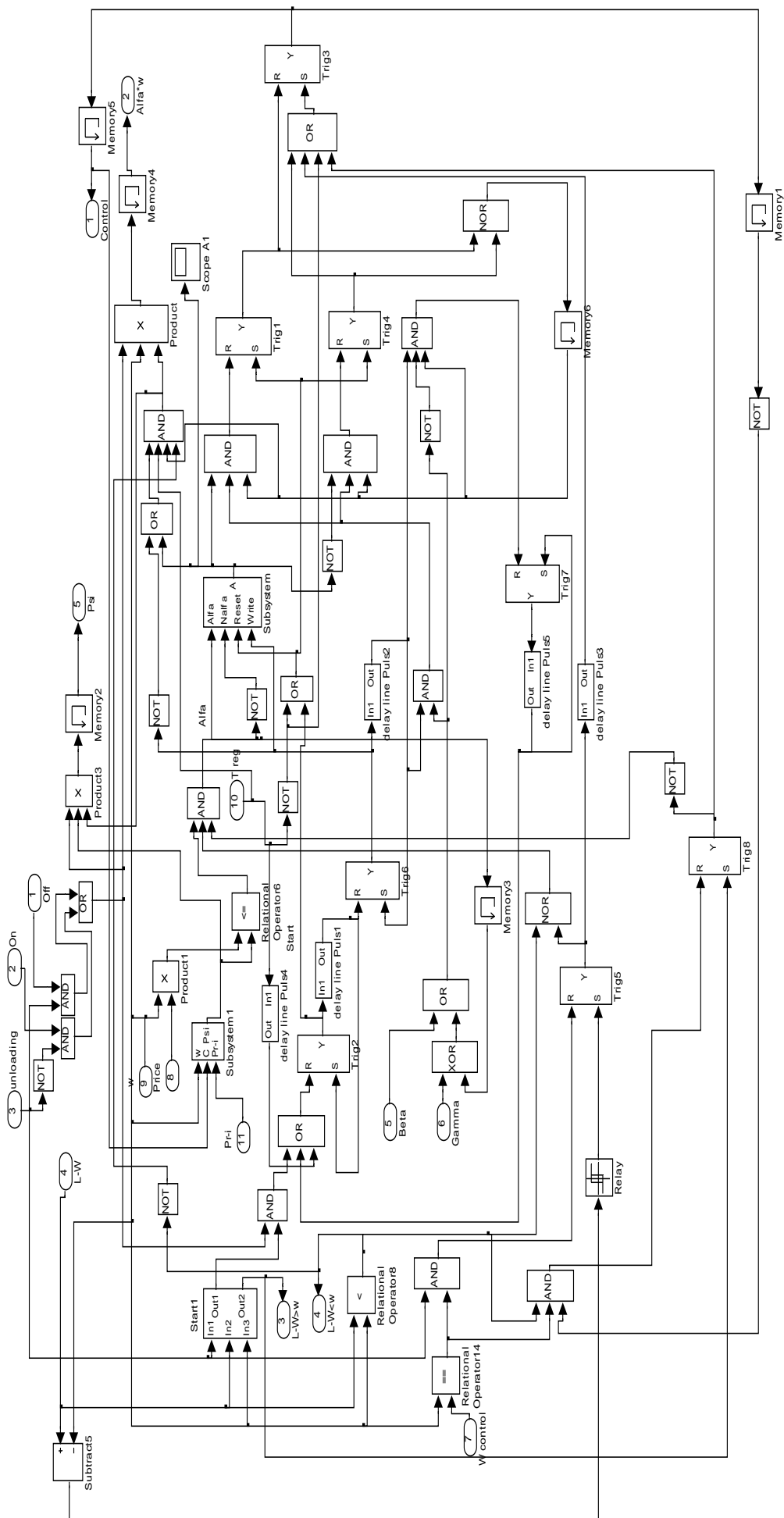


Рисунок 3.15 – Функціонально-блочна діаграма моделі автомата – учасника колективного розподілу обмеженої потужності мережі живлення

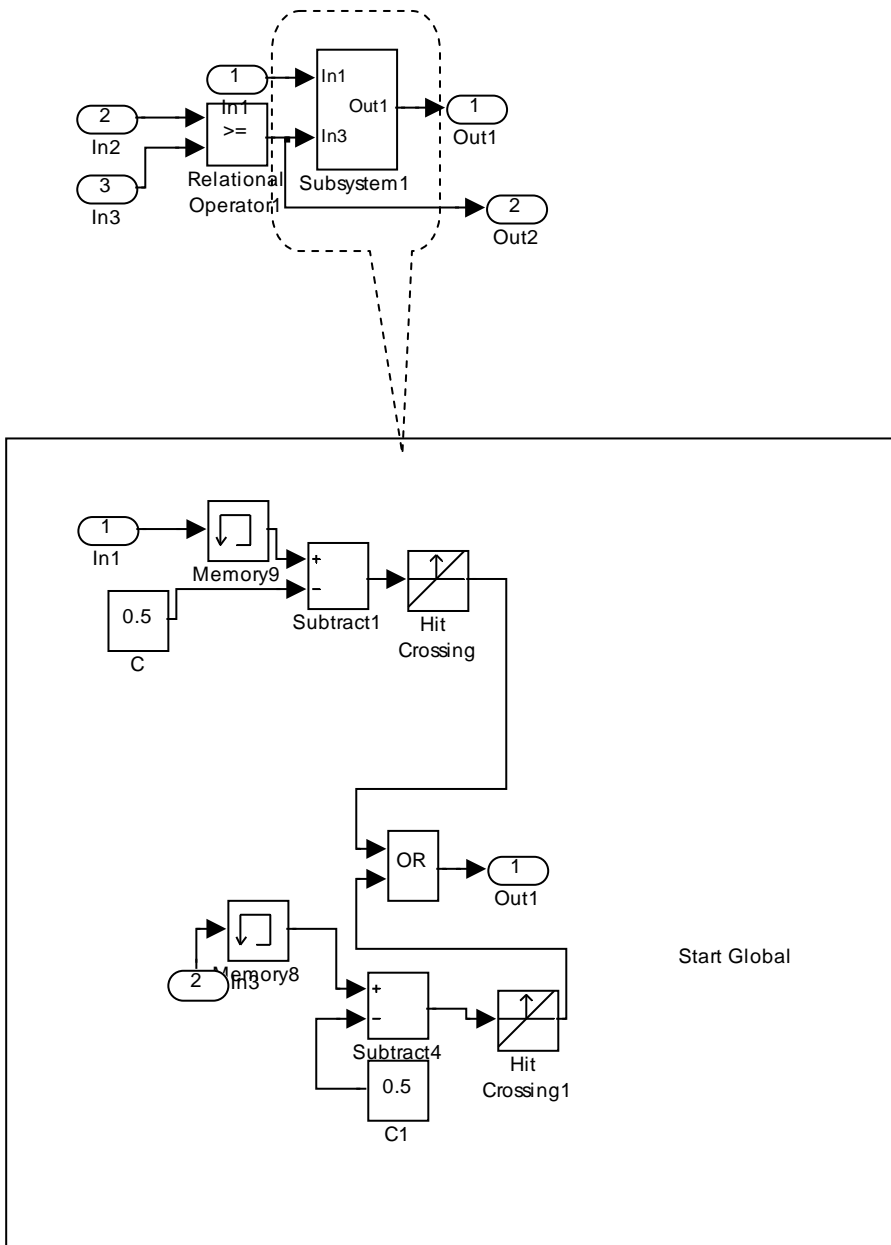


Рисунок 3.16 – Start1 – підсистема формування команди підключення автомату до розподілу ресурсу

ФБД моделі Центра – координатора колективного розподілу обмеженої потужності показана на рис. 3.21. Опис вхідних, вихідних сигналів та перелік підсистем моделі наведено у табл. 3.4. Загальна функціонально-блочна діаграма моделі показана на рис. 3.22.

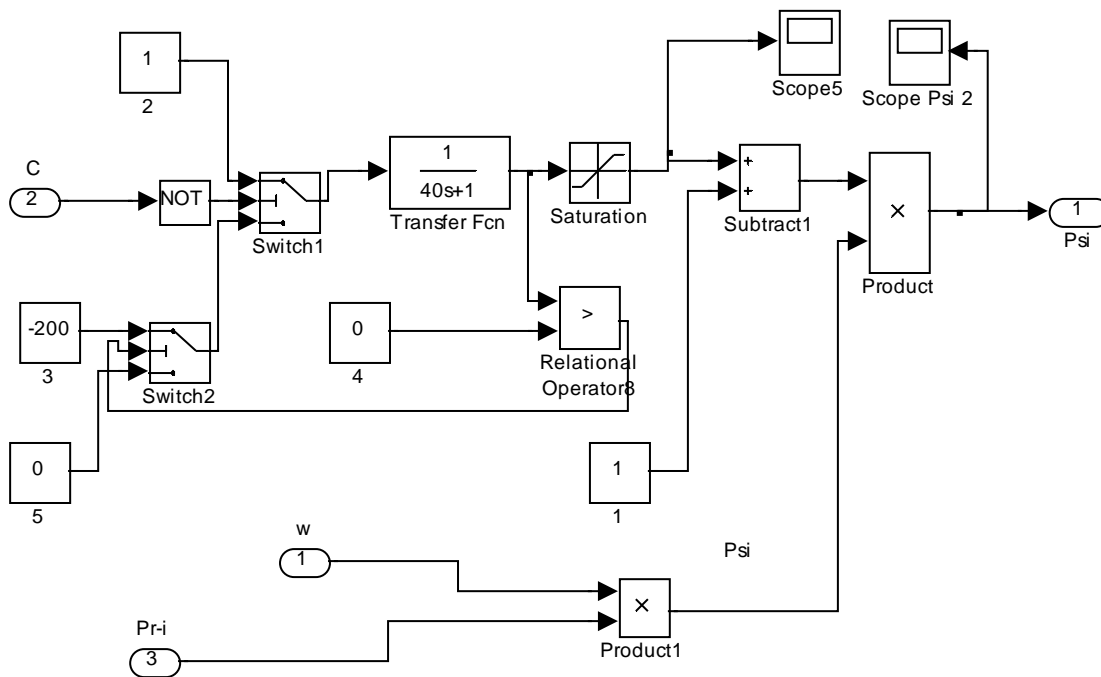


Рисунок 3.17 – Subsystem1 – підсистема формування рівня пропонованої плати за ресурс з урахуванням рівня пріоритету нагрівача

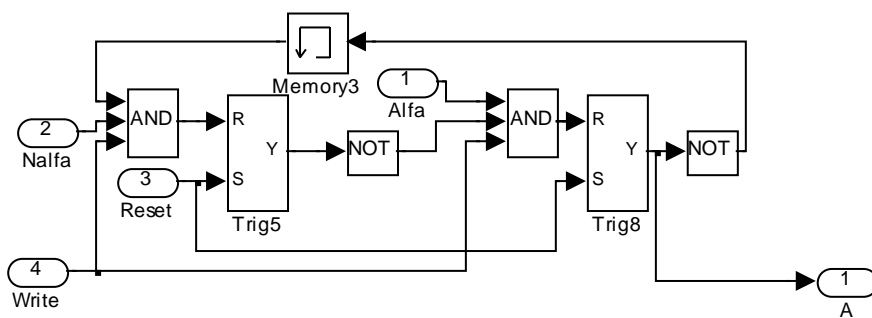


Рисунок 3.18 – Subsystem – підсистема формування рішення відносно участі автомату у використанні ресурсу (потужності)

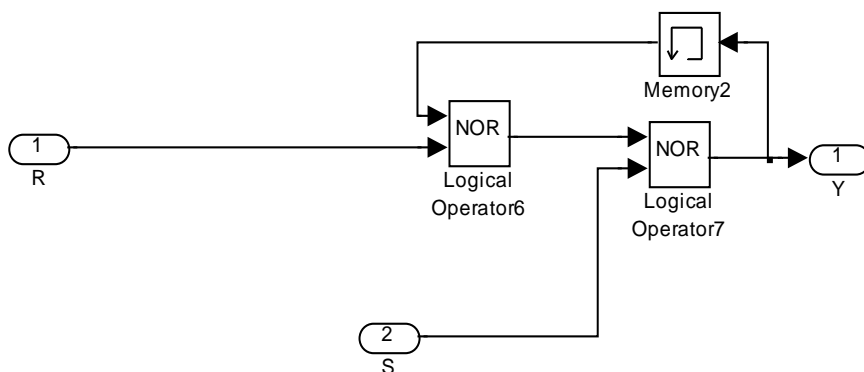


Рисунок 3.19 – Trigg – підсистема RS- триггер

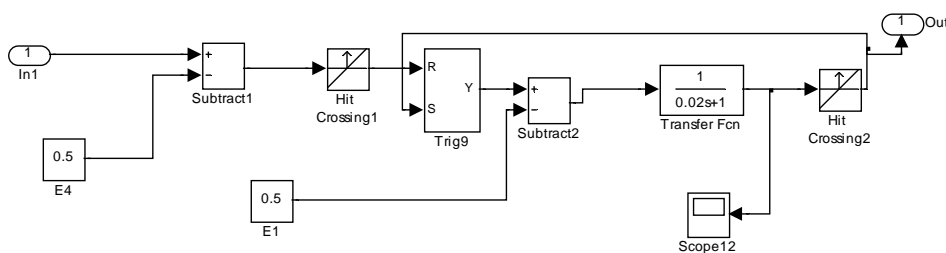


Рисунок 3.20 – DelaylinePuls – підсистема «Лінія затримки імпульсна»

Таблиця 3.4 – Вхідні, вихідні сигнали та підсистеми моделі

Вхідні сигнали	Вихідні сигнали	Перелік підсистем
<p>P1(1)...P4(4) – потужність нагрівача. L(5) – ліміт потужності в мережі живлення. L-W>w1(6)... L-W>w4(9) – залишок ресурсу більше за потребу нагрівача. L-W<w1(10)... L-W<w4(13) – залишок ресурсу менше за потребу нагрівача. w1(14)...w4(17) – запит ресурсу (потужності). Psi1(18)...Psi4(21) – пропонується плата за ресурс.</p>	<p>Unloading(1) – розгрузка мережі живлення. L-W(2) – невикористаний залишок потужності. Beta(3) – залишок потужності менше, ніж мінімальна потреба за умовою, що він більше нуля. L-W<min(4) – залишок потужності менше, ніж мінімальна потреба . Price(5) – середньозважена ціна ресурсу (потужності). W control(6) – підсумковий запит потужності в мережі електроопалювальних пристроїв.</p>	

3.5.2 Результати імітаційного моделювання процесу самоорганізації розумного теплового поля

Параметри моделі:

Ph4=1500; Ph1=1000; Ph2=1500; Ph3=1000; – потужність нагрівачів
TR4=50; TR1=55; TR2=70; TR3=55; – уставки температур нагрівачів
DT4=4; DT1=4; DT2=4; DT3=4; – модуль припустимого відхилення температур нагрівачів
Th4=15; Th1=17; Th2=16; Th3=15; – початкова температура нагрівачів
Sh=16.7; th=17.3; – тепловий потік та постійна часу нагрівача
Pr4=200; Pr1=70; Pr2=120; Pr3=70; – додаткова потужність джерел тепла у приміщеннях
Sr4=18.8; Sr1=15; Sr2=22.6; Sr3=13.7; – теплові втрати у приміщеннях
Tr4=15; Tr1=17; Tr2=16; Tr3=15; – початкові температури у приміщеннях
tr4=50; tr1=50; tr2=55; tr3=59; T=-20; – постійні часу нагріву приміщень
Pri4=90; Pri1=85; Pri2=100; Pri3=88; – рівні пріоритету нагрівачів
L1=2560; L2=2880; L3=3200; L4=3200; L5=2300; L6=3000; L7=2880;
L8=3500; L9=3500; L10=2880; t=300; – поточні рівні лімітованої потужності

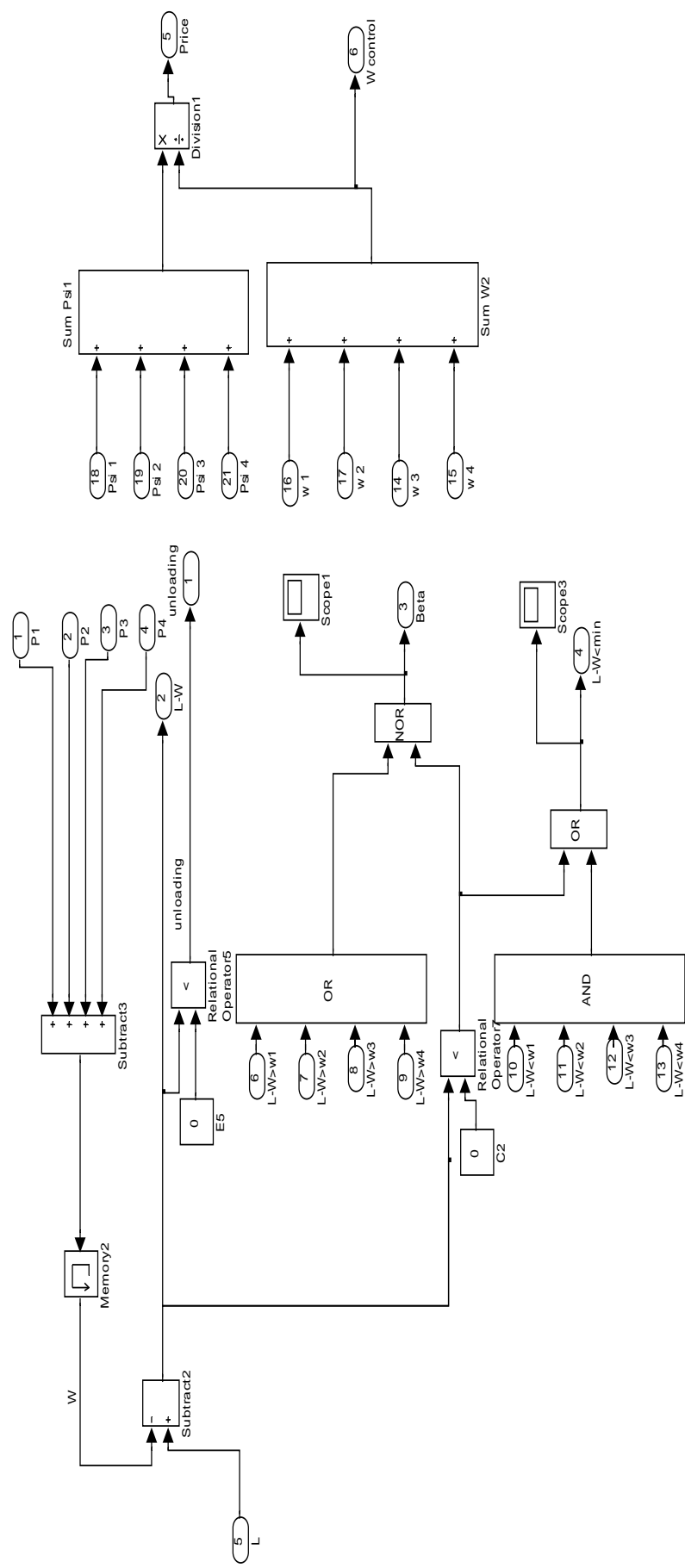
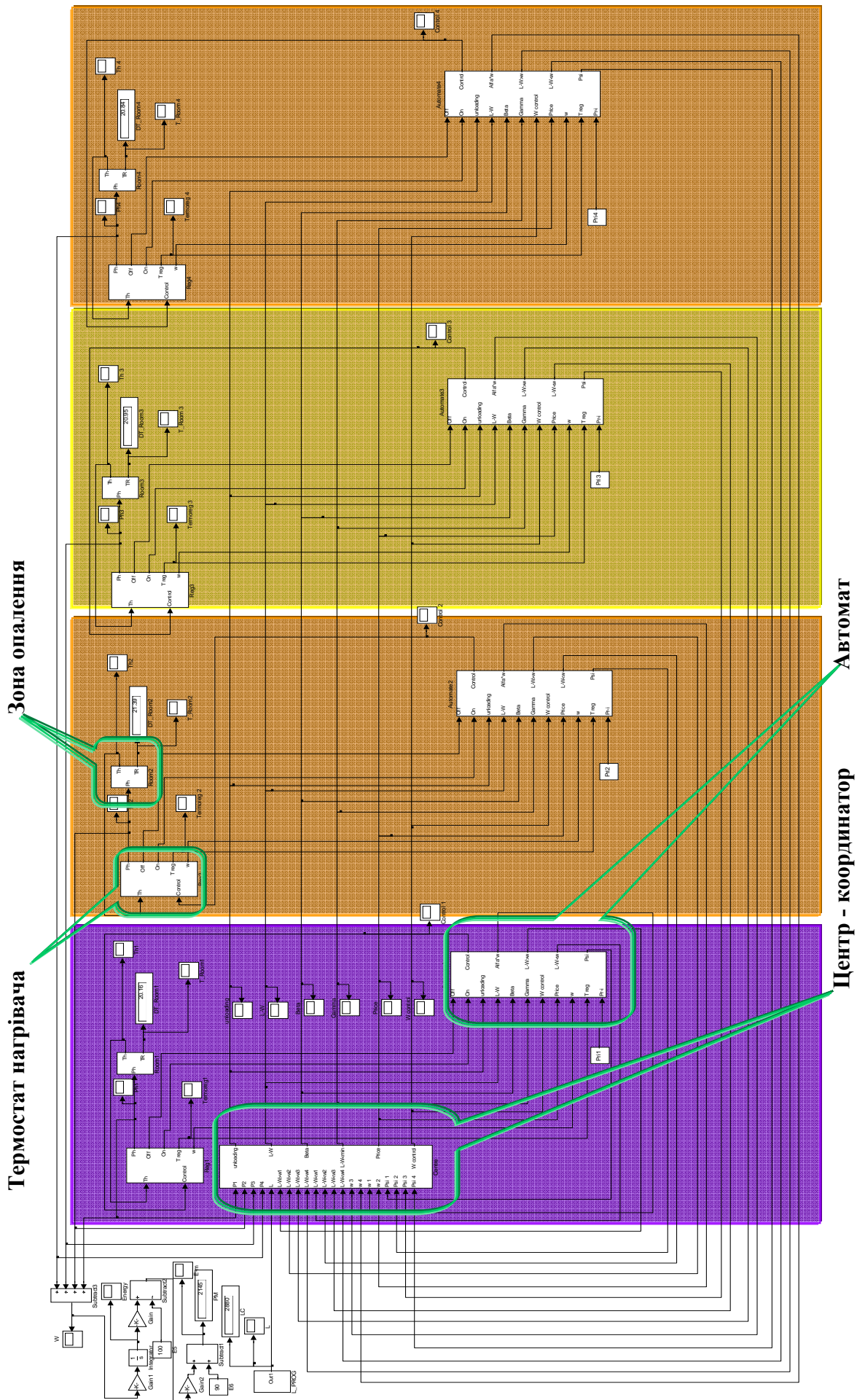


Рисунок 3.21 – Функціонально блочна діаграма моделі Центра – координатора колективного розподілу обмеженої потужності в розумному тепловому полі



Термостат нагрівача

Зона опалення

Автомат

Центр - координатор

Рисунок 3.22 – Загальна функціонально блочна діаграма моделі кіберфізичної системи «Розумне теплове поле»

Тривалість програми зміни допустимої потужності, хвил. $t = 600$; (програма тривалістю t складається з 10 однакових за тривалістю ділянок, на яких задаються значення потужності $L1...L10$).

При моделюванні роботи системи децентралізованого керування обігрівачами прямого електричного опалення ставилася задача відстежити динамічні параметри процесу розподілу та підтримки температур у кімнатах, а також дати оцінку економічній ефективності інтелектуального прямого електричного опалення. Останнє досягається за рахунок введення до моделі вузла обліку електричної енергії, яка використовується для обігріву приміщень.

Результати моделювання роботи системи при температурі зовнішнього повітря -20°C показані на осцилограмах, що наведено на рис. 3.23...3.32.

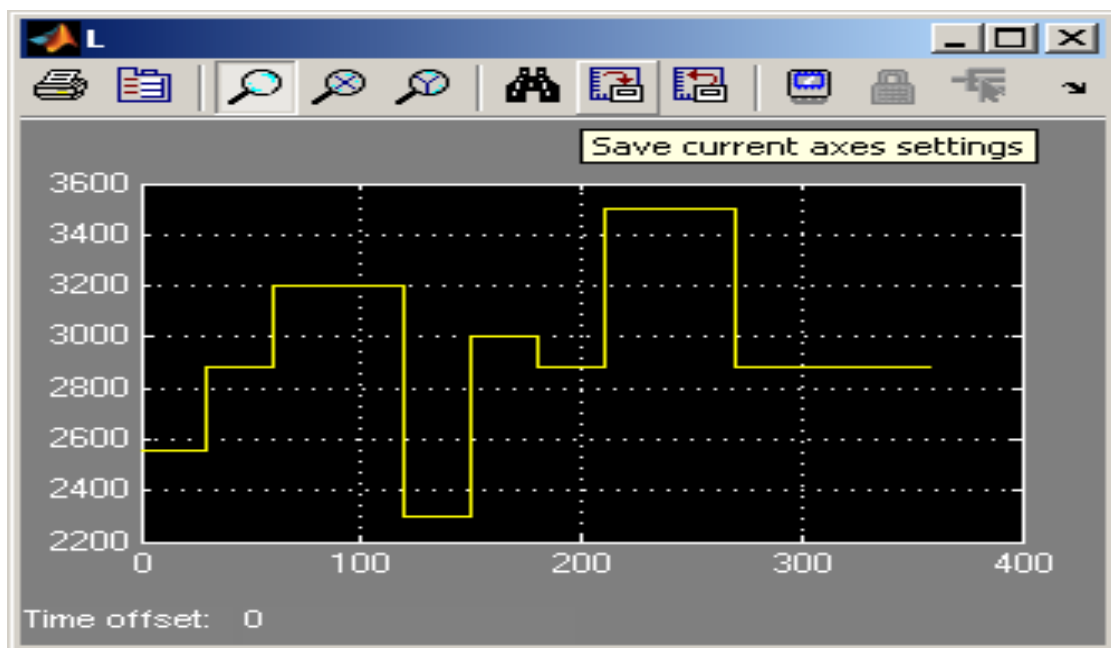


Рисунок 3.23 – Графік зміни лімітупотужності

Можна бачити, що інтелектуальна система опалення за рахунок розподілу пріоритетів автоматично компенсує розбіжність тепловіддачі в кімнатах (найбільш яскраво це можна бачити на прикладі кімнати № 2) та забезпечує рівномірний розподіл температур на комфортному рівні $20-22^{\circ}\text{C}$ майже незалежно від температури зовнішнього повітря.

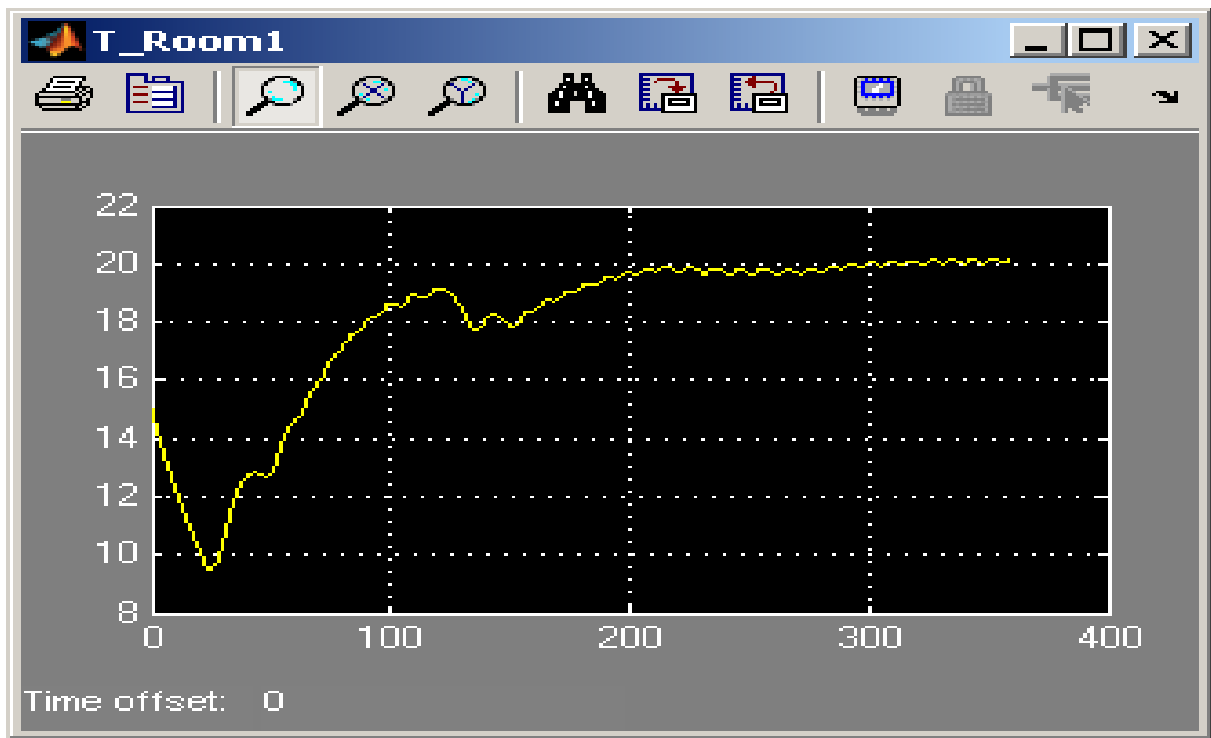


Рисунок 3.24 – Графік зміни температури у приміщенні кухні та коридору

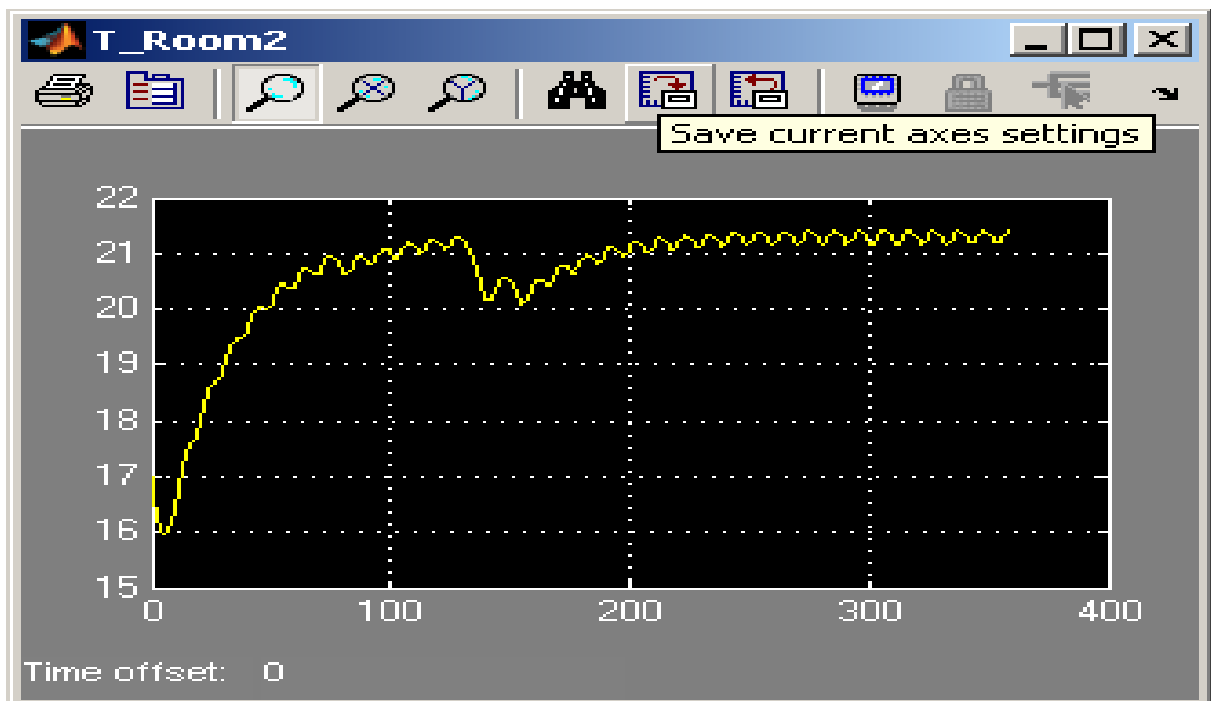


Рисунок 3.25 – Графік зміни температури у кімнаті №1

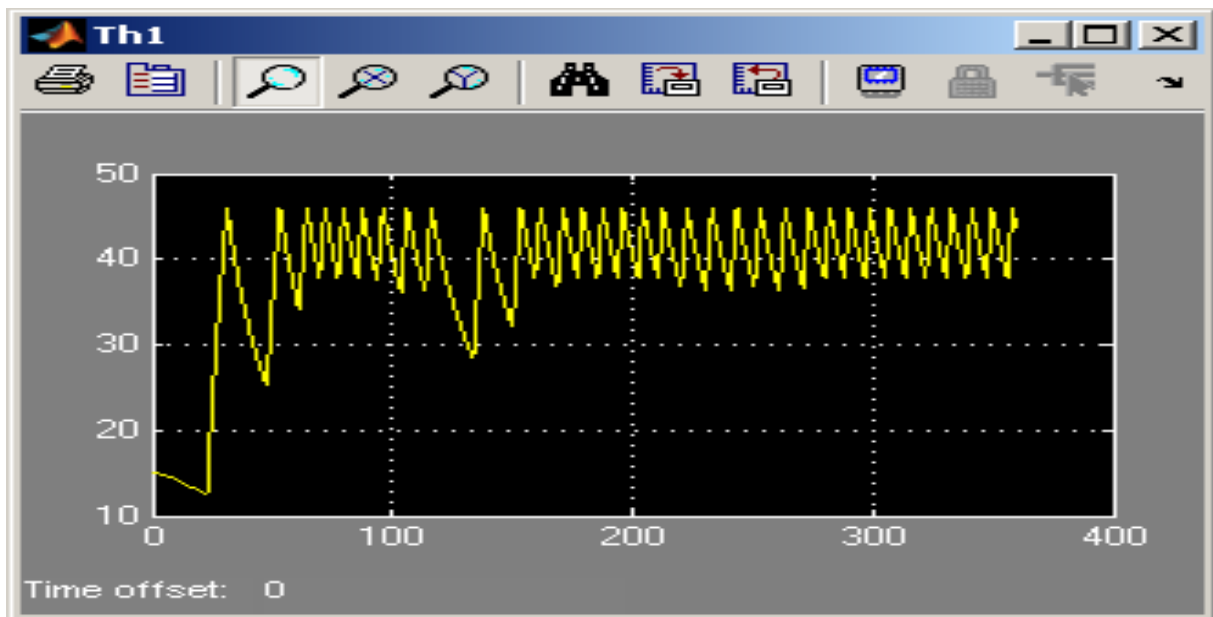


Рисунок 3.26 – Графік зміни температури нагрівача у кімнаті №1

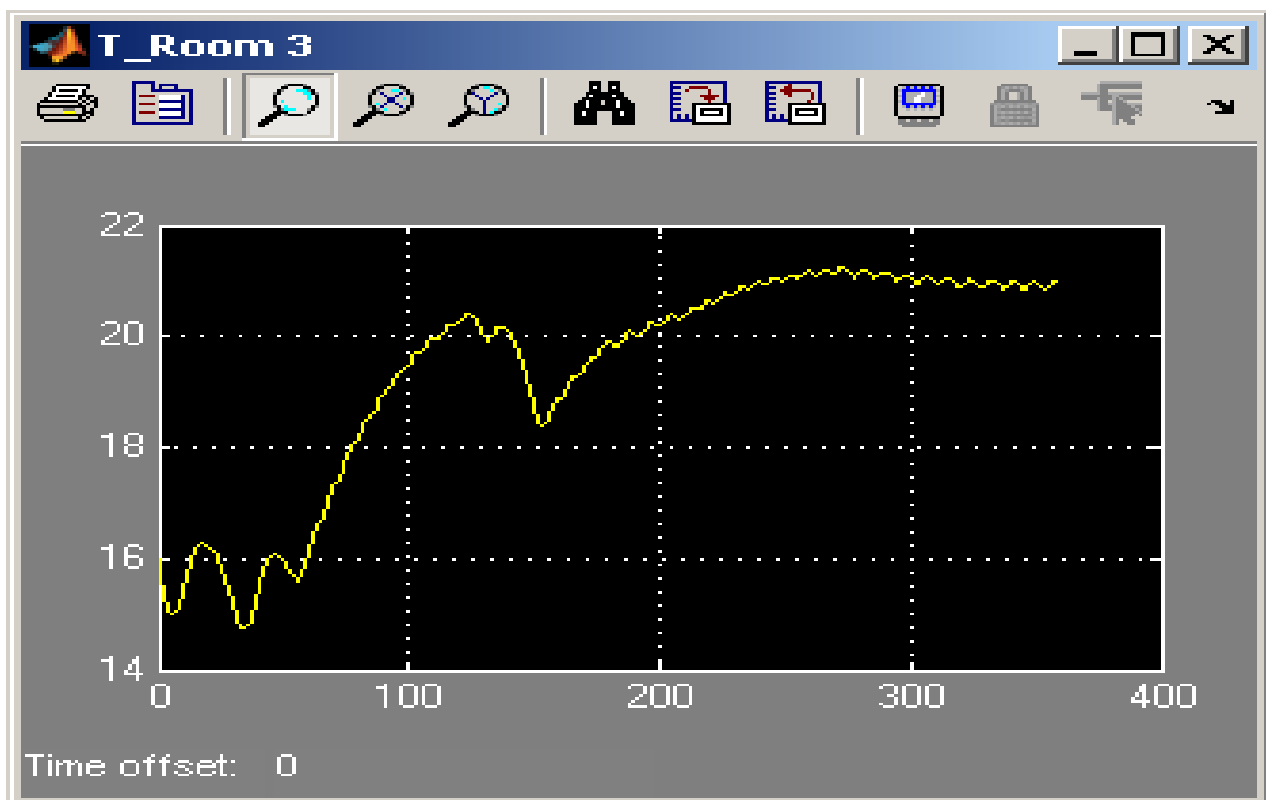


Рисунок 3.27 – Графік зміни температури у кімнаті №2

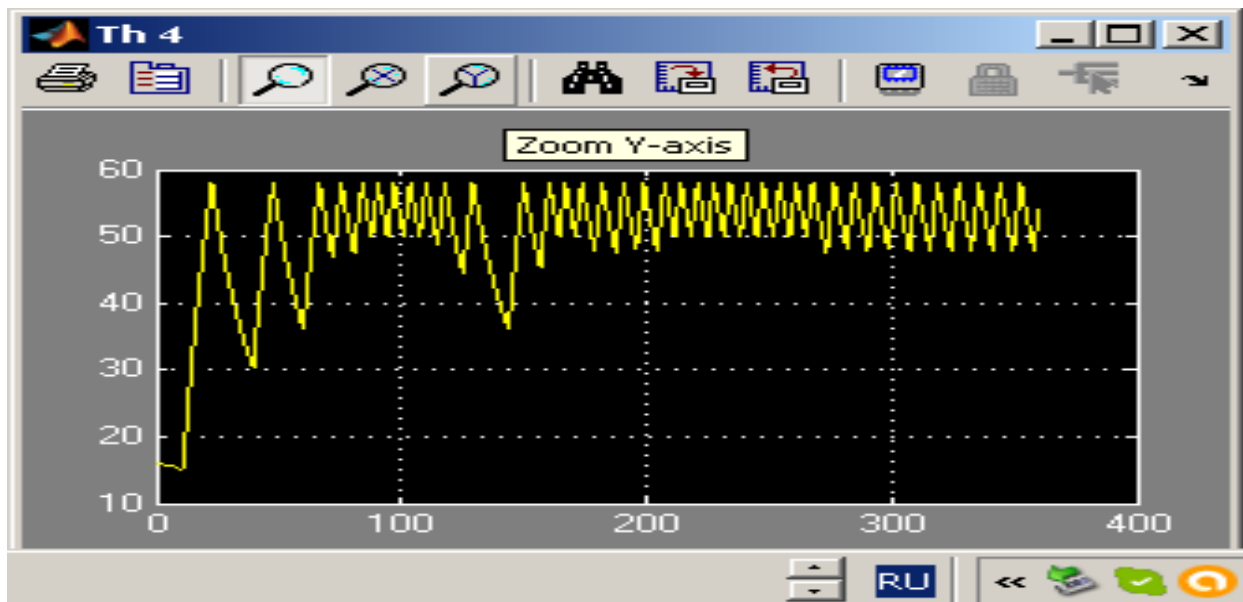


Рисунок 3.28 – Графік зміни температури нагрівача у кімнаті №2

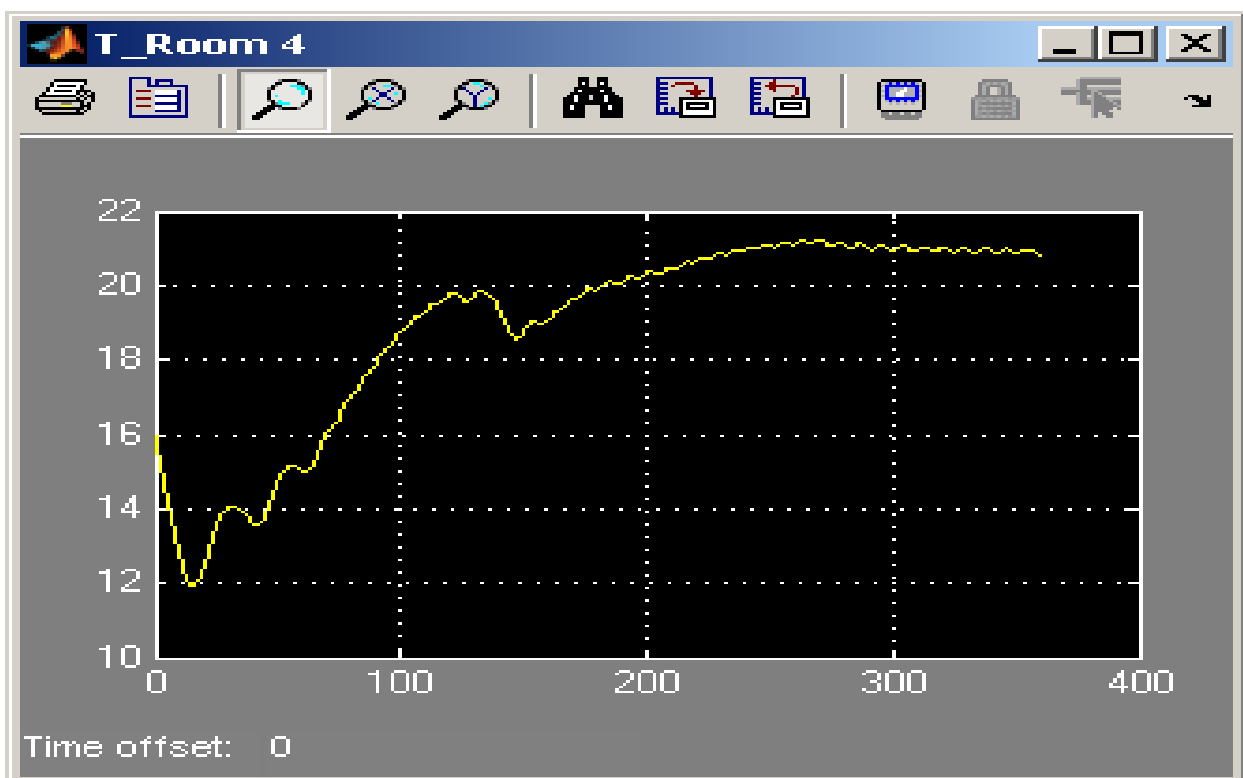


Рисунок 3.29 – Графік зміни температури у кімнаті №3

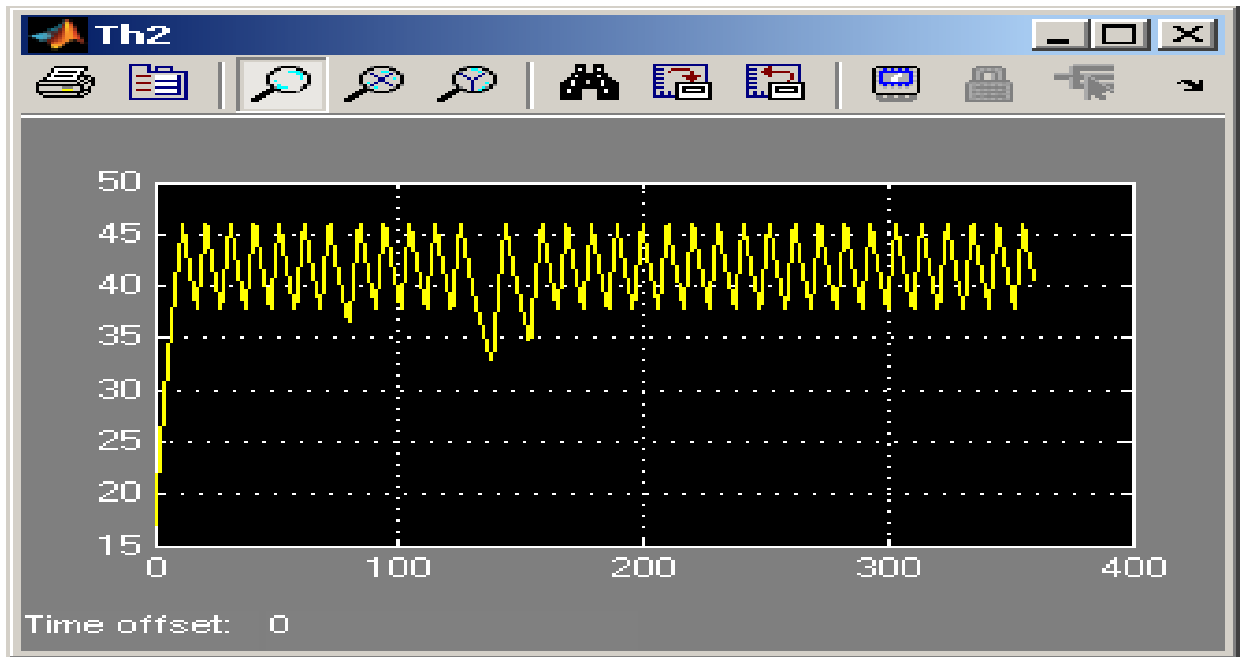


Рисунок 3.30 – Графік зміни температури нагрівача у кімнаті №3

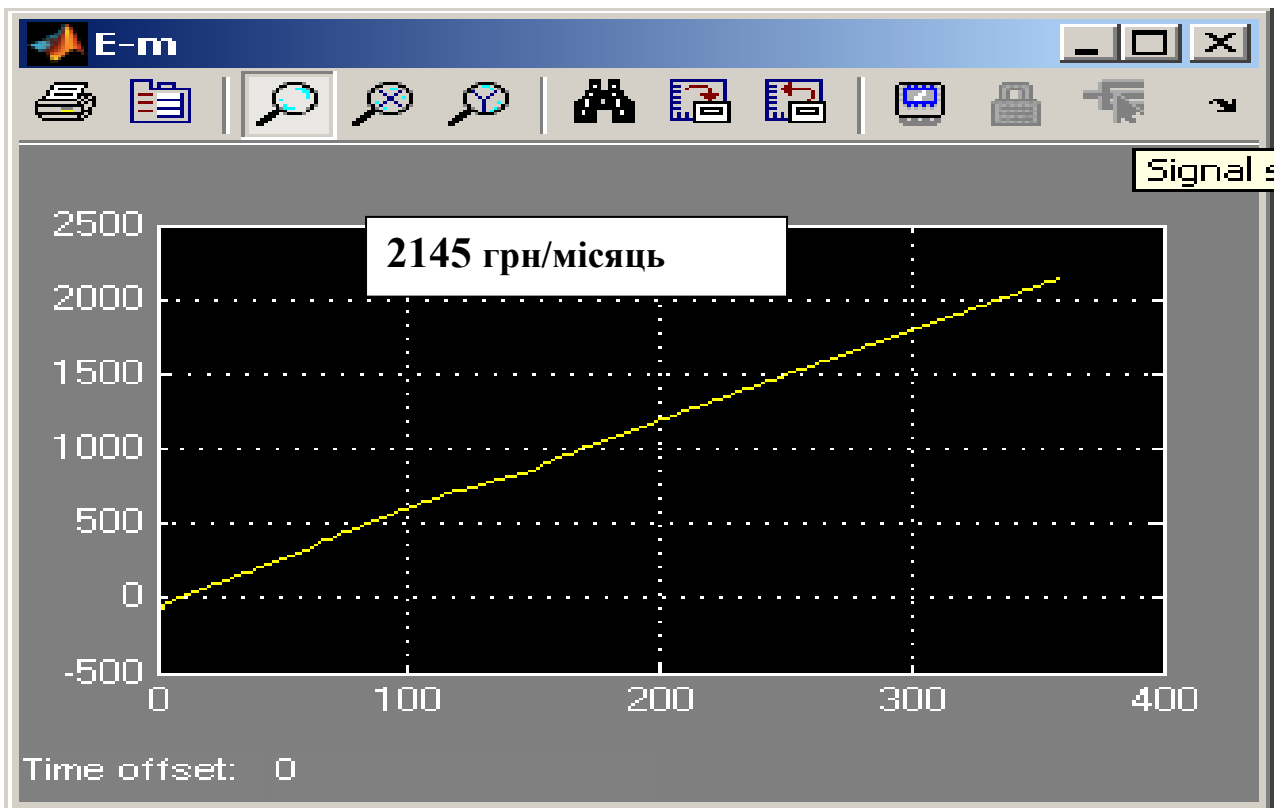


Рисунок 3.31 – Вартість електричної енергії, яка використовується для обігріву приміщень

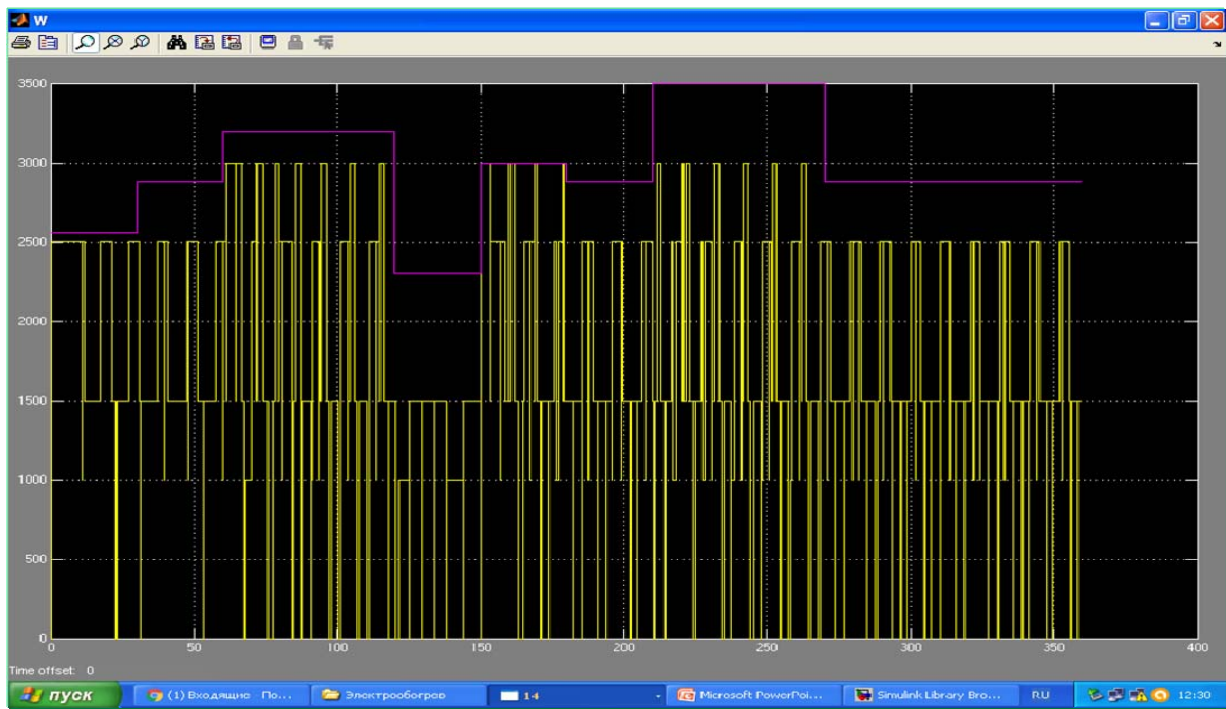


Рисунок 3.32 – Графік зміни балансу потужності в системі прямого електричного опалення

Результати моделювання роботи системи при температурі зовнішнього повітря 0°C показані на осцилограмах, що наведено на рис. 3.33...3.42.

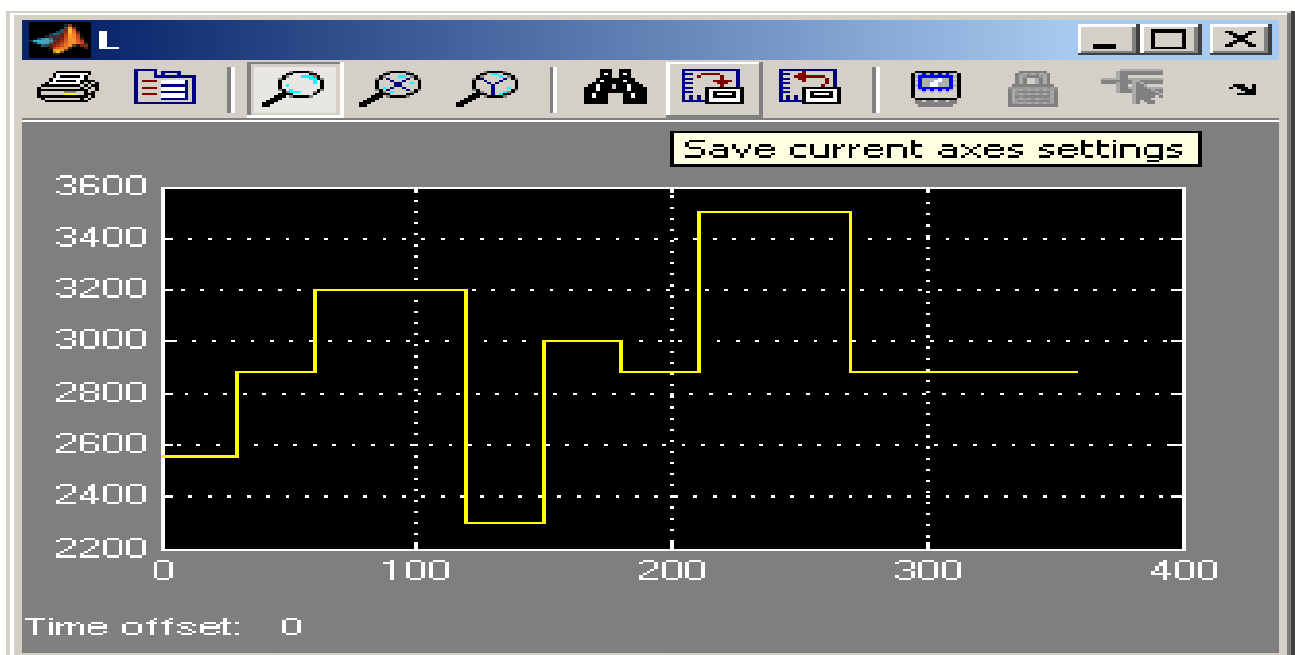


Рисунок 3.33 – Графік зміни ліміту потужності

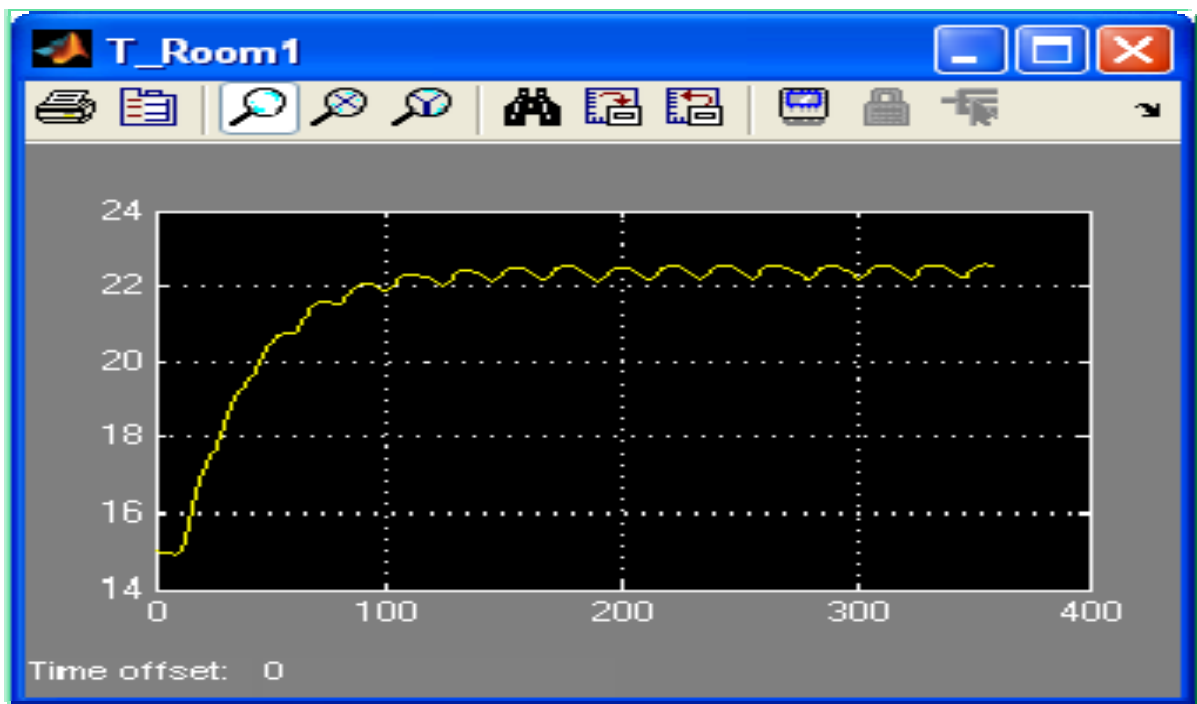


Рисунок 3.34– Графік зміни температури повітря у приміщенні кухні та коридору

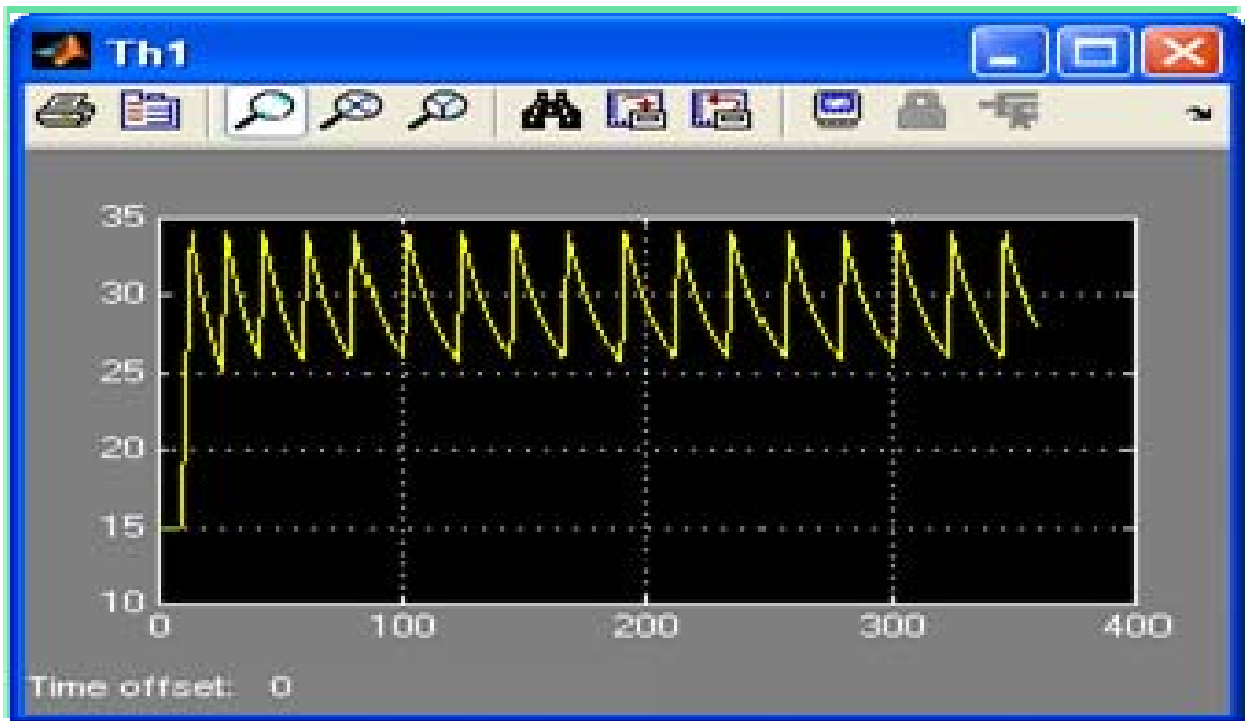


Рисунок 3.35 – Графік зміни температури нагрівача у приміщенні кухні та коридору

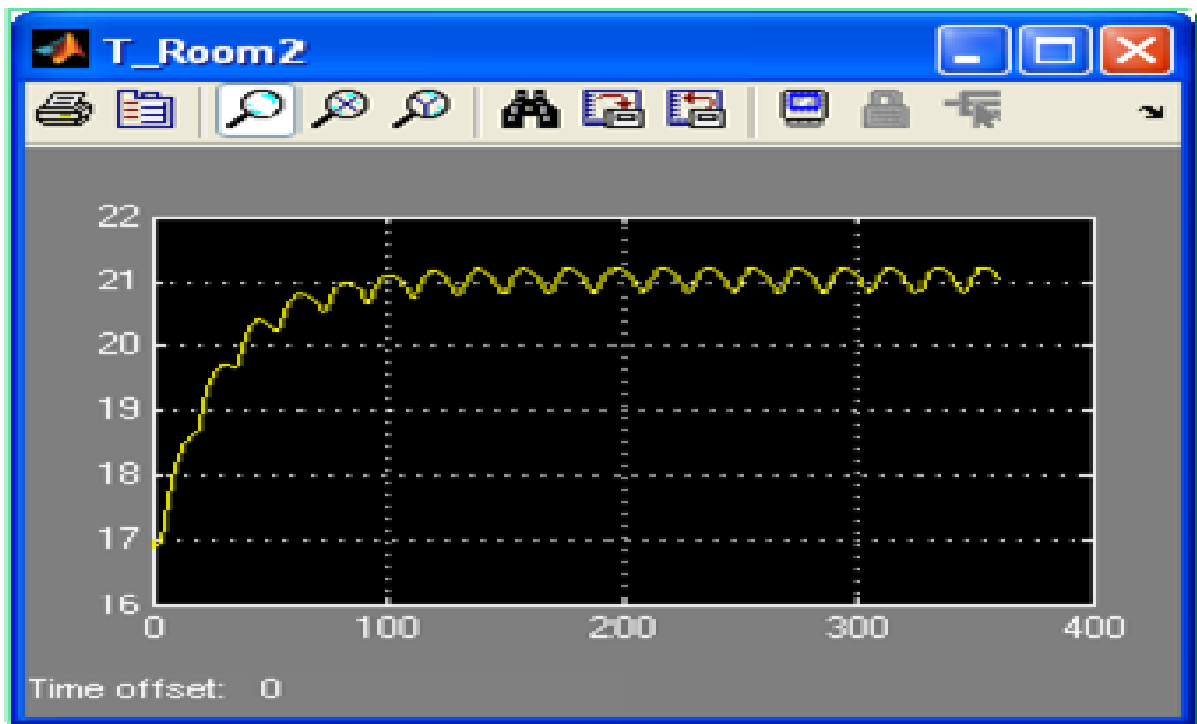


Рисунок 3.36 – Графік зміни температури повітря у кімнаті № 1

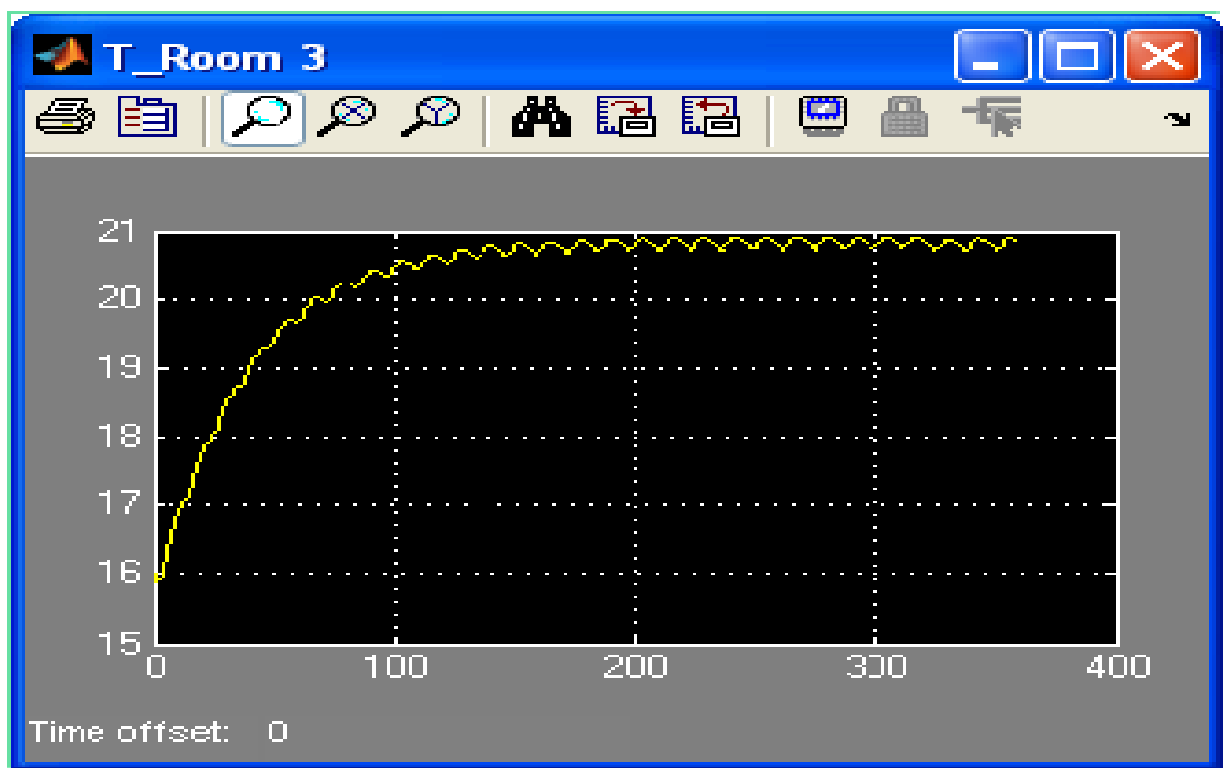


Рисунок 3.37 – Графік зміни температури повітря у кімнаті № 2

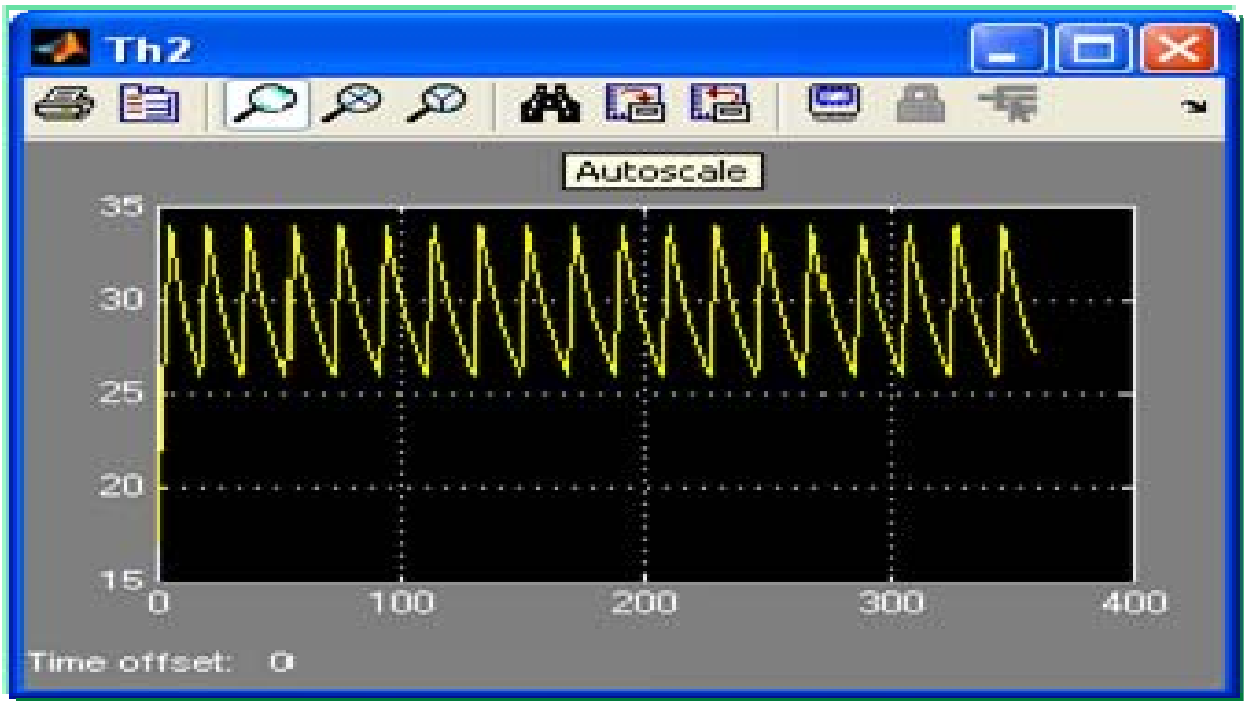


Рисунок 3.38 – Графік зміни температури нагрівача у кімнаті № 2

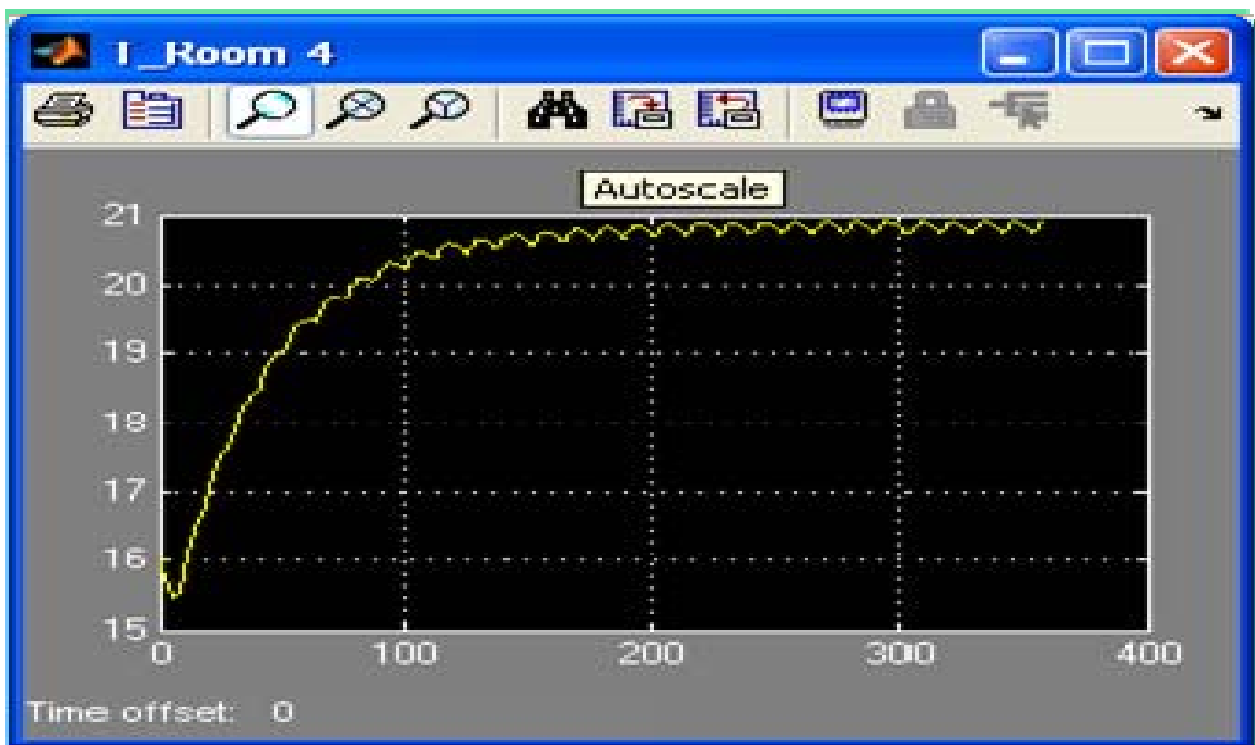


Рисунок 3.39– Графік зміни температури повітря у кімнаті № 3

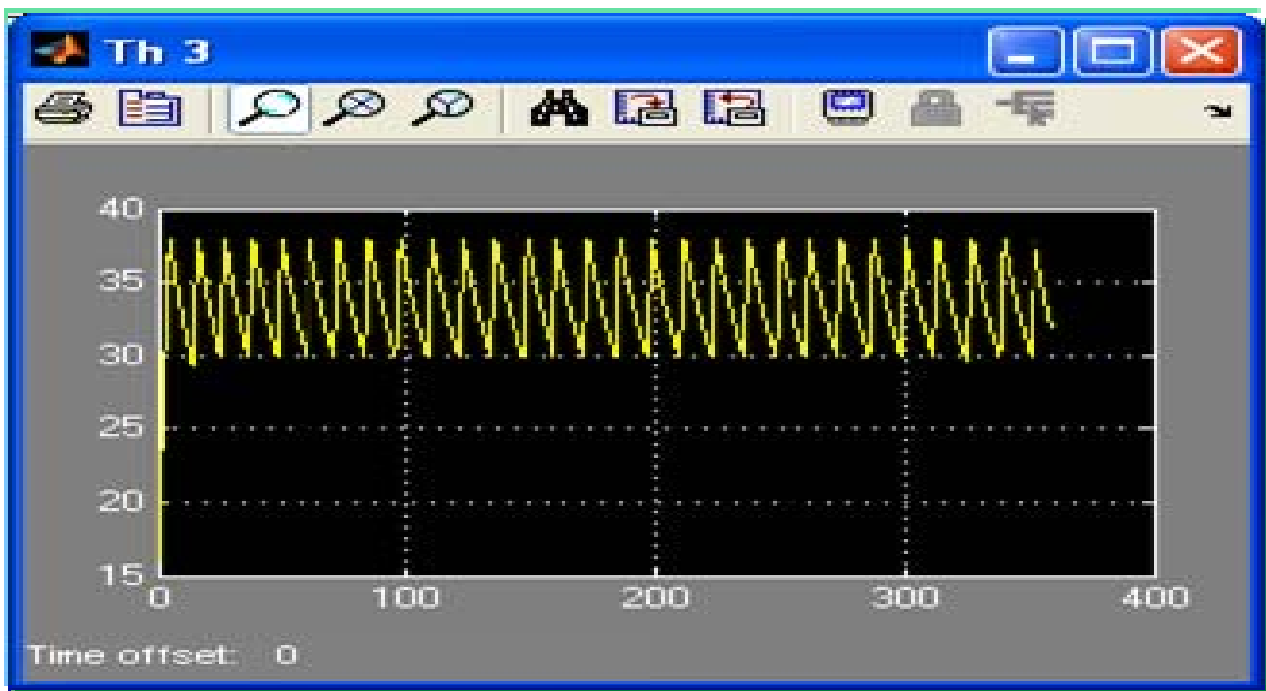


Рисунок 3.40 – Графік зміни температури нагрівача у кімнаті № 3

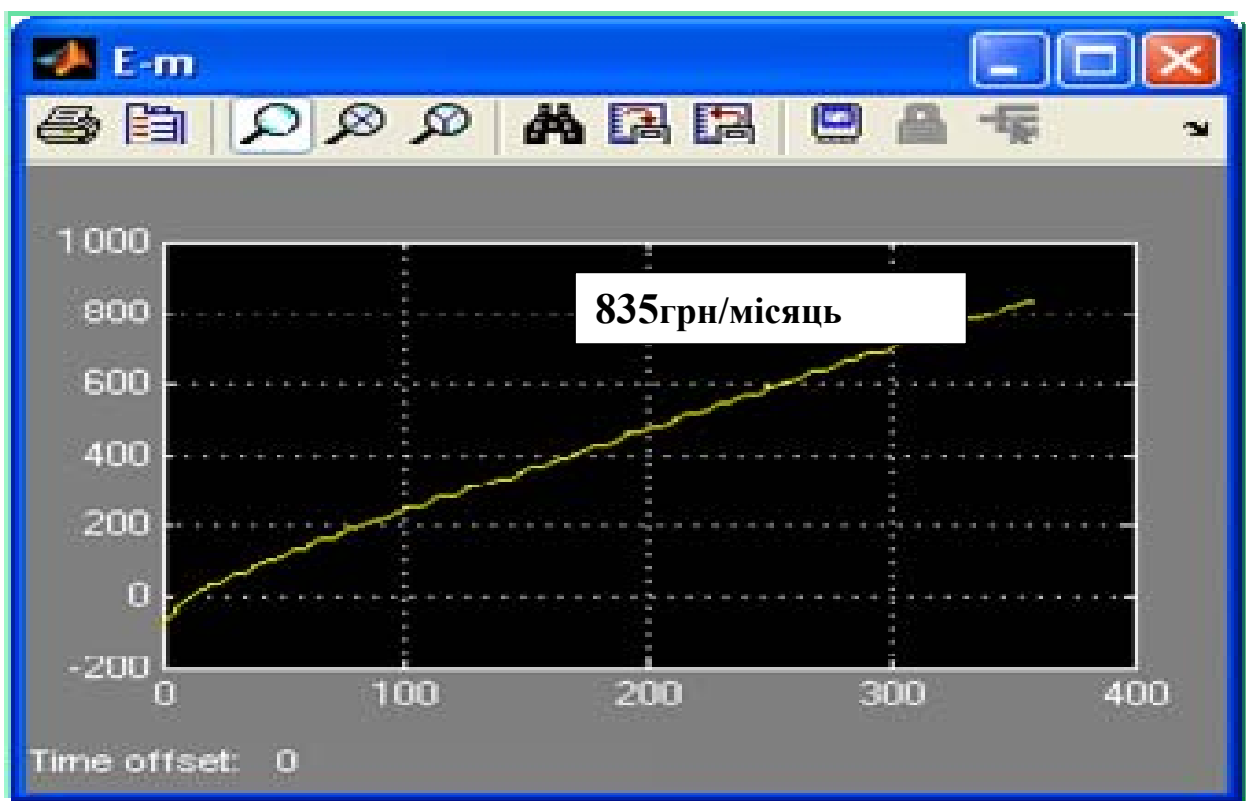


Рисунок 3.41 – Графік зміни вартості електричної енергії, яка використовується для бігріву приміщень

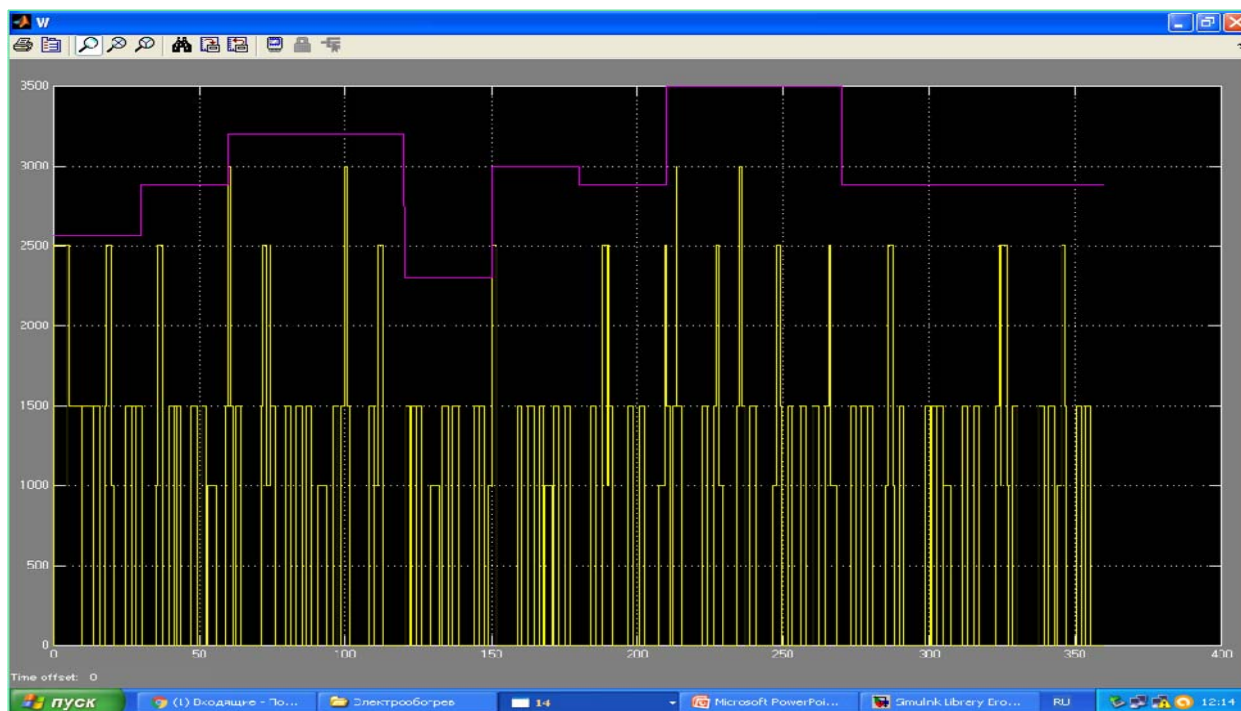


Рисунок 3.42 – Графік зміни балансу потужності в системі прямого електричного опалення

Основні результати моделювання теплових процесів в приміщенні, яке опалюється зведено до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Розподіл температур у кімнатах квартири, яка опалюється

Параметр	Кухня	Кімната №1	Кімната №2	Кімната №3
Потужність нагрівача, Вт	1500	1000	1500	1000
Початкова т-ра нагрівача, град	15	17	16	15
Тепловіддача кімнати, Вт/град	14	10	16	10
Початкова т-ра в кімнаті, град	15	17	16	15
Пріоритет роздачі тепла, %	94	95	100	98
Стала температура в кімнатах при температурі зовнішнього повітря 0 ⁰ С	22,2	21	20,9	21
Тривалість перехідного процесу при температурі зовнішнього повітря 0 ⁰ С, хвилин	100	100	100	100
Стала температура в кімнатах при температурі зовнішнього повітря -20 ⁰ С	20,0	21,5	21,0	21,0
Тривалість перехідного процесу при температурі зовнішнього повітря -20 ⁰ С, хвилин	200	200	200	200

Як видно з осцилограм на рис. 3.32 та 3.42, автоматичний розподіл температур здійснюється таким чином, що результуюча потужність, яка використовується на опалення, не перевищує допустиму потужність.

Оцінка економічної ефективності інтелектуального прямого електричного опалення.

1) Витрати на централізоване постачання теплової енергії при відсутності лічильника тепла розраховуються за тарифом 37,83 грн/місяць/кВ.м залежно від опалювальної площі квартири 60 кв.м $37,83 \times 60 = 2269,8$ грн/місяць.

2) Вартість електричної енергії при розрахунку за одноступінним тарифом згідно осцилограмі на рис. 3.31 при температурі зовнішнього повітря 0°C складає 835 грн/місяць, при розрахунку за двоступінним тарифом – 730,6 грн/місяць.

3) Економія витрат на опалення при температурі зовнішнього повітря 0°C складає від 1434,8 грн/місяць до 1539,2 грн/місяць.

4) Вартість електричної енергії при розрахунку за одноступінним тарифом згідно осцилограмі на рис. 3.31 при температурі зовнішнього повітря -20°C складає 2145 грн/місяць, при розрахунку за двоступінним тарифом – 1876,9 грн/місяць.

5) Економія витрат на опалення при температурі зовнішнього повітря -20°C складає від 124 грн/місяць до 392,9 грн/місяць.

На території України у період, коли необхідно опалення, більшість часу (80%) температура коливається близько 0°C . Будемо вважати, що в інший час температура близько -20°C

6) Середня економія витрат на опалення складає

$$E = \frac{1539,2}{100} \cdot 80 + \frac{392,9}{100} \cdot 20 = 1309,94 \text{ грн./місяць.}$$

7) Витрати на придбання опалювальних пристроїв

$$K_1 = 4 \cdot 1200 = 4800 \text{ грн.}$$

8) Витрати на придбання обладнання інтелектуальної мережі (чотири смарткони та один мережевий контролер)

$$K_2 = 4 \cdot 300 + 500 = 1700 \text{ грн.}$$

9) термін окупності $T = \frac{4800 + 1700}{1309,94} \leq 5$ місяців.

Глава 4. Алгоритм коаліційної організації інтелектуальної мережі прямого електричного опалення

Той, хто має союзників, вже не цілком незалежний.

Гаррі Трумен, 33-й президент США

У попередній главі було розглянуто таку модель колективної поведінки автоматів при керуванні процесом розподілення обмеженої електричної потужності в розумному тепловому полі, де кожен автомат приймає своє рішення незалежно від того, в якому конкретному стані знаходяться інші автомати. Самоорганізація теплового поля здійснюється під впливом колективних мод: середньої «ціни» електричної потужності, сумарної поточної потужності теплового поля, граничної поточної потужності яка може бути використана джерелами тепла. Ці величини відіграють роль параметрів порядку теплового поля. Кожен автомат розумного теплового поля приймає рішення відносно стану керованого ним джерела тепла, зважаючи на вказані параметри порядку та стан «власного» джерела тепла. В.І. Варшавський в [22] такий колектив автоматів назвав (дуже влучно з нашої точки зору) «автоматним газом». Аналогія тут у тому, що поведінка окремої молекули газу обумовлена термодинамічними параметрами газу, такими як тиск, температура, об'єм незалежно від стану та конфігурації інших молекул. А самі термодинамічні параметри обумовлені взаємодією та обмеженнями всіх молекул газу. Такий підхід зводить до мінімуму кількість інформації, яка потрібна локальному автомату для прийняття рішення. Це, в свою чергу, значно спрощує задачу децентралізованого мереже-центричного [6, 7] керування тепловим полем. Недоліком розглянутого підходу є можливість не оптимального розподілення потужності у тепловому полі з кінцевою кількістю керованих джерел тепла. Як було показано в попередній главі, алгоритм колективного розподілення потужності наближується до оптимального тим більше, чим більше в тепловому полі керованих джерел тепла. Не оптимальність тут проявляється в тому, що залишок нерозподіленої потужності може бути більше того, який

досягається повним перебором всіх можливих станів системи. Але при великій кількості джерел тепла у тепловому полі повний перебір ускладнює систему. За той час, коли він здійснюється, ситуація у системі живлення теплового поля може змінитися і одержані повним перебором рішення можуть бути не тільки не актуальні, але і протилежні очікуванім.

Залишок нерозподіленої потужності може бути зменшено майже до оптимального рівня за рахунок сумісних дій автоматів, об'єднаних у коаліційні угруповання. Цетлінім у [18] та Варшавським у [22] показана можливість і результативність коаліційної організації колективу автоматів в системах масового обслуговування. Вище у главі 2 було показано, що розумне теплове поле можна розглядати як багатоканальну систему масового обслуговування з необмеженою чергою і пуассоновським потоком заявок. Виходячи з цього розглянемо варіант коаліційної побудови мережі автоматичного розподілення потужності в розумному тепловому полі.

4.1 Алгоритм керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи

Алгоритм керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи створюється для умов керування на основі даних, якими володіє центральний автомат – контролер мережі та відсутності інформації про температурний режим у зонах обігріву. Мається на увазі, що температурний режим у зонах обігріву задає користувач через ручну настройку термостату кожного обігрівача.

Вихідними даними для алгоритму є наступна інформація, що надходить зі смартконів до контролера мережі:

- номер обігрівача;
- стан обігрівача (активний чи пасивний, тобто контакти термостату замкнені чи розімкнені);
- потужність обігрівача, кВт.

Також вихідними даними для алгоритму є сумарна потужність електроприладів, підключених до електричної мережі, які не є обігрівачами, ($P_{ін}$) та встановлений користувачем ліміт за сумарною потужністю усіх підключених до електричної мережі електроприладів ($P_{лім}$)

$$\sum_{i=1}^{N_{об}} P_{об.i} + P_{ін.} \leq P_{лім},$$

де $P_{об.i}$ – потужність i -го обігрівача, кВт; $N_{об}$ – кількість обігрівачів, підключених до електричної мережі.

Сумарна потужність електроприладів ($P_{ін}$), підключених до електричної мережі, які не є обігрівачами, обчислюється мережевим контролером як різниця між сумарною потужністю мережі живлення об'єкту опалення та сумарною потужністю опалювальних пристроїв, що підключено до мережі живлення на момент вимірювання.

В основі алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи лежить максимізація використання виділеного енергоресурсу протягом певного часу t за умови відсутності перевищення встановленого ліміту за сумарною потужністю ($P_{лім}$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^t [P_{лім.} - (P_{ін.} + \sum_{i=1}^{N_{об}} P_{об.i})] dt \rightarrow 0; \\ \sum_{i=1}^{N_{об}} P_{об.i} + P_{ін.} \leq P_{лім.} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Задачу максимізації використання виділеного енергоресурсу ускладнює той факт, що у формулі (4.1) усі доданки системи рівнянь є величинами, що змінюються у часі випадковим чином, із-за непередбачуваних режимів роботи електроприладів, що не є обігрівачами, та непередбачуваних змін умов обігріву. Тому фактично після кожної зміни хоча б одного доданку у системі рівнянь (4.1) потрібно проводити багатопараметричну оптимізацію за часовими зсувами моментів вмикання обігрівачів, що є досить трудомісткою задачею, рівень складності якої зростає у геометричній прогресії зі збільшенням кількості обігрівачів. В умовах обмеженого часу на прийняття рішення та обмежених

обчислювальних ресурсів контролера мережі значне ускладнення алгоритму розподілу енергоресурсу між обігрівачами є неприпустимим. До того ж, вирішення задачі багатопараметричної оптимізації зі збільшенням параметрів не гарантує досягнення глобального оптимуму.

Тому авторами запропоновано евристичний алгоритм розподілу енергоресурсу між обігрівачами, який базується на синхронізації за часом вмикання обраної частини обігрівачів із прогнозованим та незмінним тривалий час режимом роботи. Синхронізація вмикання у часі обраної частини (коаліційної групи) обігрівачів дозволяє розподіляти енергоресурс серед іншої частини обігрівачів таким чином, що при цьому досягається максимальне використання виділеного енергоресурсу.

Основна частина евристичного алгоритму розподілу енергоресурсу між обігрівачами з синхронізацією їх роботи за часом представлена на рис. 4.1. Починається алгоритм з процедури формування коаліційних груп обігрівачів за їхньою потужністю, яка виконується у підпрограмі з відповідною назвою (блок 2 на рис. 4.1). Згідно з цією процедурою, виділений загальний енергоресурс умовно розділяється на частини, розмір яких відповідає потужностям активних обігрівачів, що підключені до смартконів. Розділення загального енергоресурсу на частини відбувається за критерієм максимального використання цього ресурсу згідно з формулою (4.1).

Розділення загального енергоресурсу на частини надає можливість окремого та індивідуального керування розподілом кожної частини енергоресурсу. Для цього вводимо поняття «коаліційна група обігрівачів», за якою закріплюється право розподіляти певну частину загального енергоресурсу.

Наприклад, до смартконів підключені чотири обігрівача з потужностями 0,8; 1; 1,5 та 2 кВт. Для обігрівачів на поточний момент часу виділено 3 кВт. Згідно з формулою (4.1), загальний енергоресурс 3 кВт розділяється на дві частини – 1 та 2 кВт відповідно. Таким чином, маємо дві «групи»: перша

«група» розподіляє між обігрівачами частину ресурсу розміром 2 кВт, а друга – 1 кВт.

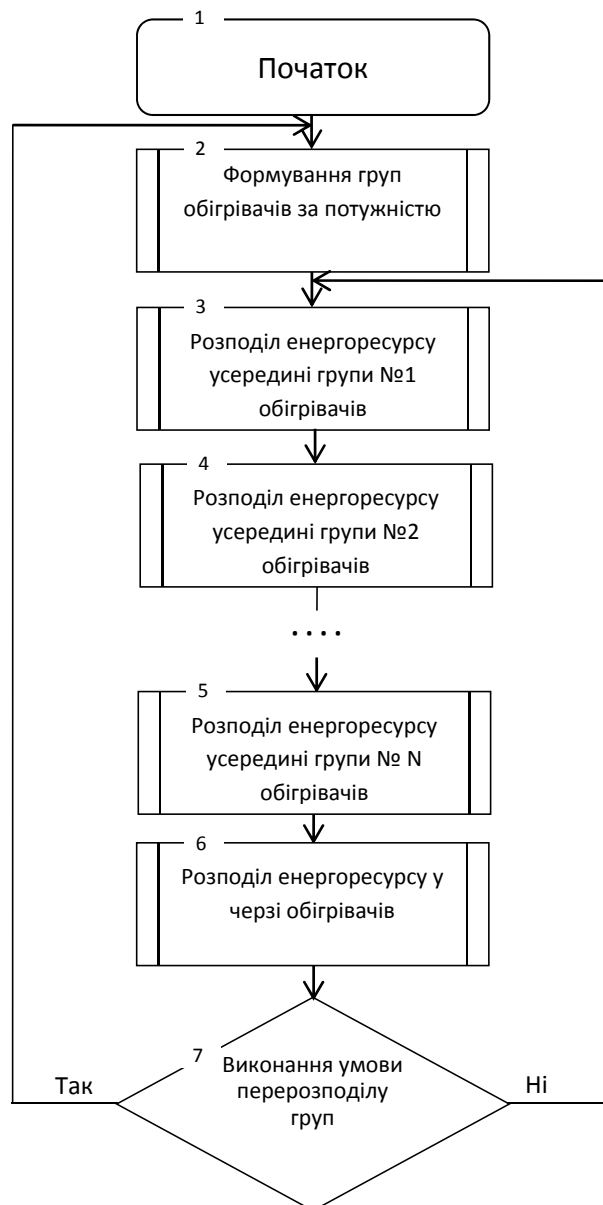


Рисунок 4.1 – Блок-схема основної частини евристичного алгоритму розподілу енергоресурсу між обігрівачами з синхронізацією їх роботи за часом

Рішення щодо виділення відповідної частини загального енергоресурсу групою тому чи іншому обігрівачу приймається у результаті виконання підпрограм у блоках 3-5 на рис. 4.1. Особливість алгоритму розподілу частини загального енергоресурсу усередині групи у тому, що одному з обігрівачів групою присвоюється статус, який дозволяє цьому обігрівачу завжди

отримувати енергоресурс, на відміну від інших обігрівачів. Для присвоєння цього статусу повинні виконуватись дві умови:

1. Потужність обігрівача має дорівнювати потужності групи, тобто розміру частини загального енергоресурсу, яка закріплена за групою.

2. Обігрівач має працювати у режимі підтримки температури у зоні обігріву, тобто має спостерігатися циклічний характер вмикання та вимикання обігрівача через його термостат.

Фактично група постійно виділяє свій енергоресурс обігрівачу з особливим статусом («власному» обігрівачу), а коли він вимикається, пропонує вільний енергоресурс іншим обігрівачам. Це означає, що більший пріоритет мають ті обігрівачі, потужності яких достатньо для підтримки заданого користувачем температурного режиму у зоні обігріву.

Далі вільний енергоресурс усіх груп об'єднується та пропонується усім іншим обігрівачам без особливого статусу, які формують чергу. Об'єднаний вільний енергоресурс груп отримує той обігрівач із черги, для якого виконується умова максимального використання виділеного загального енергоресурсу. Рішення щодо виділення енергоресурсу обігрівачу у черзі приймається у результаті виконання підпрограми у блоці 6 на рис. 4.1.

У блоці 7 на рис. 4.1 перевіряється виконання наступних умов перерозподілу груп:

1. Тривалий час (3 періоди) є групи без «власного» обігрівача.

2. На одну групу припадає більше двох обігрівачів у черзі з аналогічною потужністю.

3. Зміна встановленого користувачем ліміту за сумарною потужністю $P_{\text{лім}}$.

4. Зміна сумарної потужності електроприладів, підключених до електричної мережі, які не є обігрівачами $P_{\text{ін}}$.

Якщо хоча б одна з умов перерозподілу груп виконується, відбувається перехід до блоку 2 з метою формування нової комбінації груп, а якщо ні – відбувається перехід до блоку 3 та заново виконуються підпрограми розподілу енергоресурсу у групах та у черзі.

Розглянемо підпрограми основної частини евристичного алгоритму розподілу енергоресурсу більш детально на основі їх блок-схем алгоритмів. На рис. 4.2 наведена блок-схема алгоритму підпрограми «Формування груп обігрівачів за потужністю».

За допомогою блоків 2-4 на рис. 4.2 здійснюється перебір усіх можливих комбінацій одночасно увімкнених обігрівачів. Далі у блоці 5 для кожної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів відбувається обчислення їх сумарної потужності (Sum_P) за формулою

$$Sum_P \leq a \cdot P_1 + b \cdot P_2 + \dots + z \cdot P_N,$$

де P_1, P_2, \dots, P_N – потужності, відповідно, першого, другого та N -го обігрівачів, кВт; a, b, \dots, z – коефіцієнти стану обігрівачів (1 – увімкнений, 0 – вимкнений); N – кількість обігрівачів, підключених до електричної мережі.

Також у блоці 5 формується вектор поточної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів vec :

$$vec = [a \cdot P_1 \quad b \cdot P_2 \quad \dots \quad z \cdot P_N].$$

У шостому блоці алгоритму на рис. 4.2 перевіряються дві умови – перевищення поточною сумарною потужністю одночасно увімкнених обігрівачів свого максимального значення (початкове максимальне значення сумарної потужності дорівнює нулю) та відсутність перевищення сумарною потужністю свого ліміту ($P_{лім} - P_{ін}$). Якщо обидві умови задовольняються, відбувається перехід до блоку 7, а якщо хоча б одна з умов не виконується, то переходимо до блоку 4, тобто до нової комбінації одночасно увімкнених обігрівачів.

За допомогою блоку 7 на рис. 4.2 створюється цикл з метою вилучення комбінацій одночасно увімкнених обігрівачів, для яких спостерігається оптимальна сумарна потужність, однак при цьому виконується умова неефективного розподілу енергоресурсу усередині груп обігрівачів. Умова належності поточної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів до небажаної з точки зору неефективного розподілу енергоресурсу перевіряється у блоці 8, де

вектор поточної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів vec порівнюється з одним чи декількома векторами небажаних комбінацій одночасно увімкнених обігрівачів $last_j$, де j – номер небажаної комбінації обігрівачів (початкове значення кількості небажаних комбінацій обігрівачів i дорівнює нулю, тобто протягом першого виклику підпрограми одразу виконається умова виходу із циклу).

Якщо поточна комбінація одночасно увімкнених обігрівачів є небажаною (умова у блоці 8 виконується), то здійснюється перехід до блоку 4, тобто до нової поточної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів.

Якщо умова у блоці 8 не виконується, відбувається перехід до блоку 7, тобто до нового варіанту небажаної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів (інкремент параметру j у блоці 7). У разі виконання умови виходу із циклу (закінчення варіантів небажаної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів) здійснюється перехід до блоку 9.

У блоці 9 оновлюються максимальна сумарна потужність Sum_P_{max} та вектор оптимальної комбінації vec_{opt} одночасно увімкнених обігрівачів.

Після перебору усіх можливих комбінацій одночасно увімкнених обігрівачів виконується умова виходу із циклу у блоці 2 на рис. 4.2 та здійснюється перехід до блоку 10, де перевіряється умова неефективного розподілу енергоресурсу усередині груп обігрівачів. Умовою є занадто велика кількість потужних обігрівачів у черзі, коли їх кількість ($N_{nom.ob.}$) перевищує кількість відповідних груп з аналогічною потужністю ($n_{gr.}$) більше ніж у три рази (див. блок 10 на рис. 4.2). Якщо умова у блоці 10 виконується, то відбувається перехід до блоку 11, де небажана комбінація обігрівачів з точки зору неефективного розподілу енергоресурсу усередині груп запам'ятовується як вектор $last_i$ та здійснюється інкремент параметру i . Далі відбувається перехід до блоку 2 для нового пошуку оптимальної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів за критерієм максимального використання виділеного енергоресурсу без врахування записаних небажаних комбінацій обігрівачів.

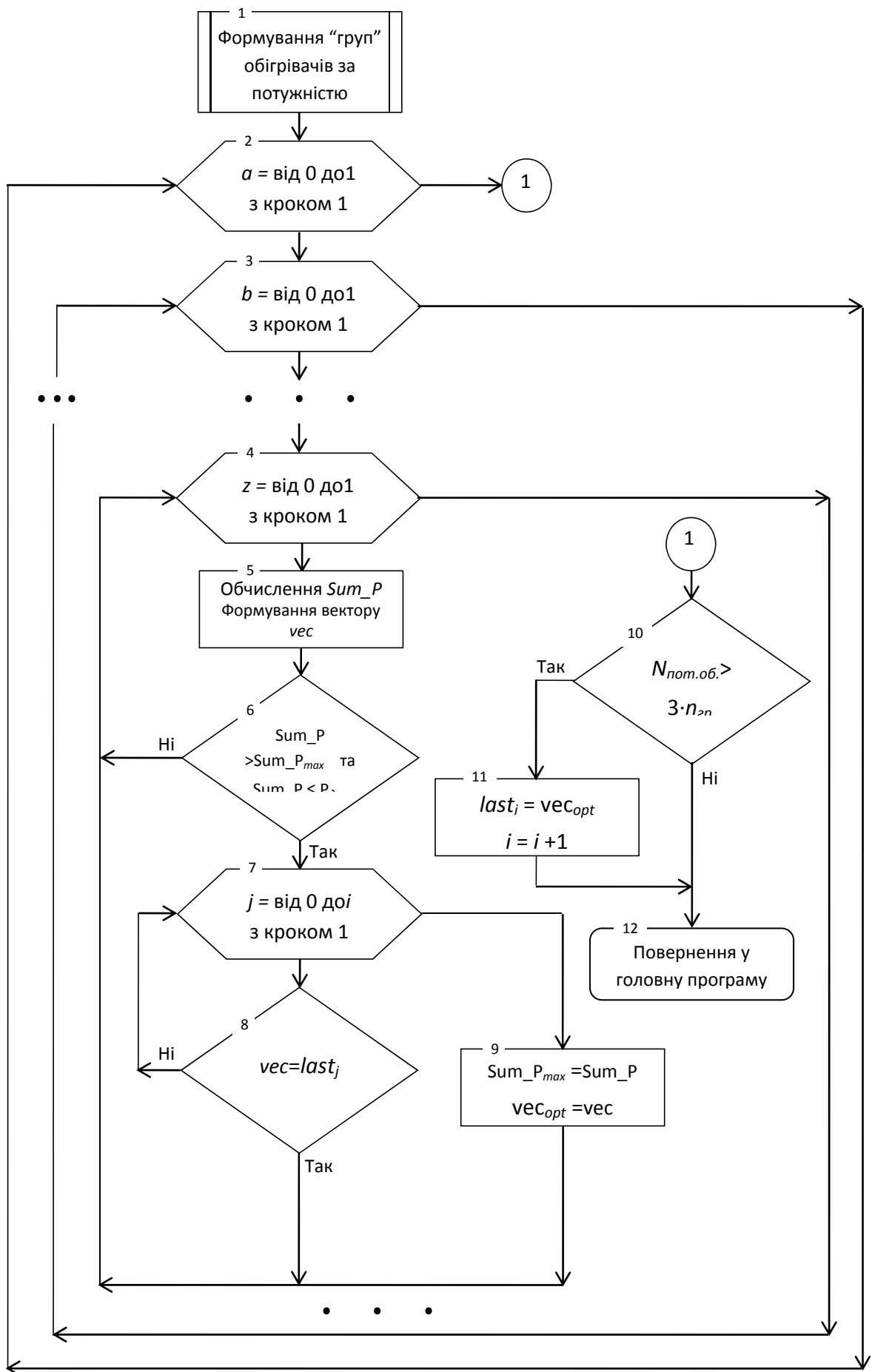


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму формування коаліційних груп обігрівачів за потужністю

Якщо умова у блоці 10 не виконується, здійснюється перехід до блоку 12, де реалізується процедура повернення у головну програму вектора vec_{opt} , елементи якого вказують на оптимальну комбінацію одночасно увімкнутих обігрівачів за критерієм максимального використання виділеного енергоресурсу.

Розглянемо підпрограму «Розподіл енергоресурсу усередині групи № N обігрівачів», блок-схема алгоритму якої наведена на рис. 4.3.

На початку алгоритму у блоці 2 на рис. 4.3 перевіряється умова присутності у «групі» обігрівача з особливим статусом, тобто «власного» обігрівача. Якщо такого обігрівача немає, то виконується підпрограма (рис. 4.3).

«Рівномірний розподіл ресурсу між обігрівачами» (блок 3 на рис. 4.3), після чого відбувається повернення у головну програму (перехід до блоку 15). У разі виконання умови у блоці 2 перевіряється наступна умова щодо синхронізації у часі роботи «власного» обігрівача поточної групи з роботою «власних» обігрівачів інших груп (блок 4 на рис. 4.3).

Якщо робота «власного» обігрівача не синхронізована, то у блоці 5 порівнюються період роботи «власного» обігрівача $T_{об}$ та загальний період для усіх «груп» $T_{пер}$. Якщо період роботи «власного» обігрівача перевищує загальний період для усіх груп, то він призначається загальним періодом для усіх «груп» (блок 6 на рис. 4.3). Якщо умова у блоці 5 не виконується, загальний період не змінюється та відбувається перехід до блоку 7.

У блоці 7 аналізується поточне значення часу, протягом якого обігрівач вимкнений, але має активний стан ($T_{вим.акт.ном}$). Щоб робота «власних» обігрівачів усіх коаліційних груп відбувалася з однаковим періодом, періоди майже усіх «власних» обігрівачів (окрім одного, що задає загальний період) штучно подовжені за рахунок зміщення у часі моменту підключення до електричної мережі. Тобто, деякий час коаліція відмовляє «власному» обігрівачу, який запитує енергоресурс (контакти термостату замкнені). При цьому період обігрівача $T_{об}$ складається з трьох складових:

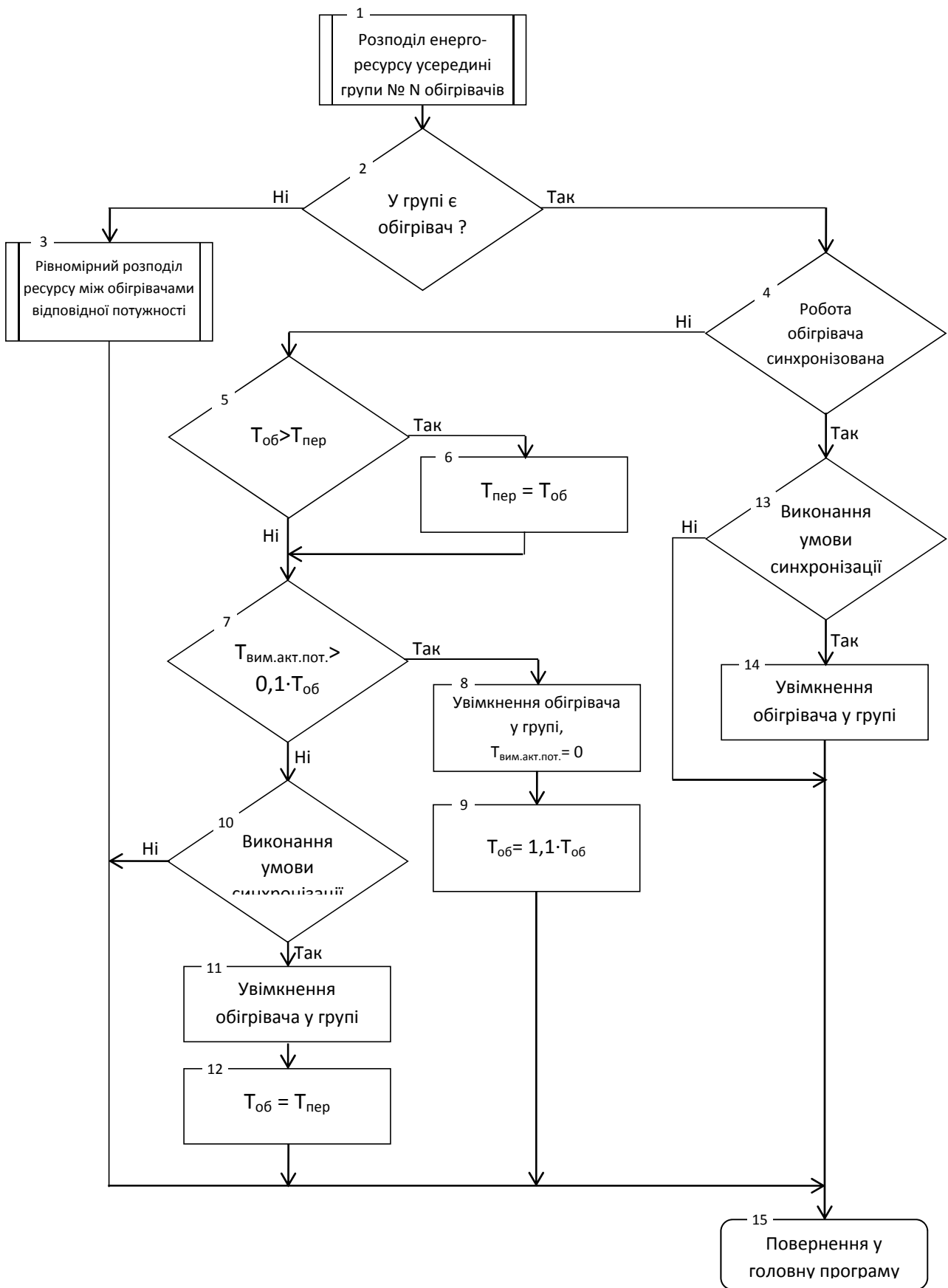


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритму розподілу енергоресурсу усередині групи № N обігрівачів

$$T_{об} = T_{вим.пас} + T_{вим.акт} + T_{вим.увім},$$

де $T_{вим.пас}$ – час, протягом якого обігрівач вимкнений та має пасивний стан, хв;

$T_{вим.акт}$ – час, протягом якого обігрівач вимкнений та має активний стан, хв;

$T_{вим.увім}$ – час, протягом якого обігрівач увімкнений, хв.

Окрім однакового періоду синхронізація роботи обігрівачів у часі передбачає певний зсув по фазі графіка роботи кожного обігрівача відносно початку періоду. Цей зсув по фазі визначається наступними правилами синхронізації роботи «власних» обігрівачів у групах:

1. Розділення вільного ресурсу у часі. Це правило завжди застосовується для синхронізації роботи потужних обігрівачів, щоб відповідні групи могли постійно у часі пропонувати сумарний вільний ресурс обігрівачам аналогічної потужності або менш потужним обігрівачам із черги. Якщо цієї синхронізації не робити, то за умови наявності одного обігрівача у черзі протягом часу, коли обидва «власних» та потужних обігрівача вимкнені, відбувається неповне використання виділеного енергоресурсу.

Також це правило може застосовуватись для синхронізації роботи менш потужних «власних» обігрівачів, якщо кількість менш потужних обігрівачів у черзі перевищує кількість більш потужних обігрівачів.

Якщо застосовується перше правило синхронізації роботи «власних» обігрівачів, то момент увімкнення обігрівача поточної групи повинен співпадати з моментом вимкнення обігрівача іншої групи, з яким він синхронізується, – це є умовою синхронізації.

2. Об'єднання вільного ресурсу у часі. Це правило завжди застосовується для синхронізації роботи менш потужних обігрівачів, щоб відповідні групи могли пропонувати об'єднаний вільний ресурс більш потужним обігрівачам із черги, коли обидва «власних» обігрівача вимкнені. Ця синхронізація роботи менш потужних обігрівачів у групах проводиться тоді, коли кількість більш потужних обігрівачів у черзі перевищує кількість менш потужних обігрівачів.

Якщо застосовується друге правило синхронізації роботи «власних» обігрівачів, то момент увімкнення обігрівача поточної групи повинен співпадати з моментом увімкнення обігрівача іншої групи, з яким він синхронізується, – це є умовою синхронізації.

За умови проведення процедури синхронізації обігрівача поточної групи необхідний зсув за фазою графіка роботи обігрівача відносно початку періоду задається через збільшення параметру $T_{вим.акт}$. Але, якщо між моментом переходу обігрівача в активний стан та моментом його увімкнення згідно з умовою синхронізації занадто великий проміжок часу, починає виконуватись нерівність

$$T_{вим.пас} + T_{вим.акт} + T_{увім} > T_{пер},$$

що є неприйнятним. Крім того, збільшення параметру $T_{вим.акт}$ призведе до зменшення середньої температури поверхні обігрівача та, відповідно, погіршення точності підтримки заданої температури у зоні обігріву.

Тому у блоці 7 на рис. 4.3 перевіряється умова перевищення параметром $T_{вим.акт.ном}$ однієї десятої періоду обігрівача. Якщо умова виконується, то примусова пауза у роботі обігрівача приймається занадто великою, процедура синхронізації відкладається на наступний період та обігрівач вмикається (блок 8 на рис. 4.3). При цьому параметр $T_{вим.акт.ном}$ скидається в нуль.

На наступному періоді проміжок часу між моментами переходу обігрівача в активний стан та його увімкнення згідно з умовою синхронізації зміниться, оскільки період обігрівача, як правило, відрізняється від загального періоду. Але, якщо період обігрівача та загальний період близькі один до одного або є однаковими, то синхронізація може, відповідно, проходити занадто довго або ніколи не завершитися. Тому, кожний раз, коли синхронізація відкладається, період обігрівача у блоці 9 на рис. 4.3 збільшується на 10%. Відповідно, збільшується максимальний час очікування обігрівача в активному стані на виконання умови синхронізації. Завдяки цьому,

прискорюється скорочення проміжку часу між моментами переходу обігрівача в активний стан та його увімкнення згідно з умовою синхронізації.

У разі виконання умови синхронізації у блоці 10 обігрівач поточної «групи» вмикається (блок 11), а його період призначається таким, як і в інших «групах» (блок 12). Після цього відбувається повернення в основну програму.

Якщо ж робота «власного» обігрівача поточної групи вже синхронізована, у блоці 13 перевіряється умова синхронізації. Якщо вона виконується, обігрівач вмикається (блок 14 на рис. 4.3) та відбувається повернення в основну програму, а якщо ні – повернення в основну програму відбувається без вмикання обігрівача.

Алгоритм підпрограми «Рівномірний розподіл ресурсу між обігрівачами» (блок 3 на рис. 4.3) представлений на рис. 4.4.

Починається алгоритм з блоку 2, за допомогою якого організовується цикл з метою послідовного перебору усіх обігрівачів, що наразі мають активний статус (їх кількість дорівнює $N_{об}$). Для кожного i -го обігрівача у блоці 3 на рис. 4.4 перевіряється умова щодо рівності потужностей обігрівача та поточної «групи». Якщо умова не виконується, відбувається перехід до блоку 2, тобто до наступного обігрівача, а якщо виконується – у блоці 4 перевіряється зміна статусу обігрівача за останній час. Якщо обігрівач на момент попереднього виклику підпрограми був у пасивному стані, а наразі перебуває в активному, то відбувається перехід до блоку 5, де цьому обігрівачеві присвоюється особливий статус «власний обігрівач групи N ». У разі невиконання умови у блоці 4 відбувається перехід одразу до блоку 6, де розраховується пріоритет i -го обігрівача за формулою

$$Pr_i = 1 - \frac{T_{увім.i}}{T_{увім.i} + T_{вим.акт.i}}. \quad (4.2)$$

Для запобігання частого вмикання та вимикання обігрівачів за умови рівномірного розподілу енергоресурсу кожний обігрівач отримує енергоресурс на однаковий проміжок часу, що визначається користувачем ($T_{зад}$). У блоці 7 контролюється закінчення цього часу шляхом порівняння змісту таймера ($T_{тайм}$)

та величини $T_{зад}$. Якщо час не пройшов, то відбувається перехід до блоку 12, тобто повернення у попередню підпрограму, а якщо час пройшов – здійснюється перехід до блоку 8, де пріоритет i -го обігрівача порівнюється з максимальним пріоритетом серед відповідних обігрівачів (початкове значення максимального пріоритету приймається рівним нулю).

Якщо пріоритет i -го обігрівача менше, робиться перехід до блоку 2, тобто до іншого обігрівача. У протилежному випадку i -ий обігрівач призначається обігрівачем з максимальним пріоритетом ($k=i$) та оновлюється максимальний пріоритет серед відповідних обігрівачів (блок 9 на рис. 4.4).

Після закінчення послідовного перебору всіх обігрівачів з активним статусом відбувається вихід із циклу та перехід до блоку 10, де вмикається обігрівач з максимальним пріоритетом (k -ий обігрівач). Далі пріоритет цього обігрівача приймається рівним нулю, а таймер також скидається в нуль (блок 11 на рис. 4.4), після чого відбувається повернення у попередню підпрограму.

Алгоритм підпрограми «Розподіл енергоресурсу у черзі обігрівачів» (блок 6 на рис. 4.1) показаний на рис. 4.5.

У блоці 2 для кожного обігрівача у черзі за формулою (4.2) розраховується пріоритет Pr_i . Далі за допомогою блоків 3-5 організовується декілька вкладених один в одного циклів з метою перебору усіх можливих комбінацій одночасно увімкнених обігрівачів з активним статусом, що очікують на підключення до електричної мережі.

У блоці 6 перевіряється умова належності обігрівачів у поточній комбінації до черги. Якщо умова не виконується, відбувається перехід до блоку 5, тобто до нової комбінації обігрівачів. У разі виконання умови у блоці 6 здійснюється перехід до блоку 7, де робиться перевірка одночасного виконання наступних двох умов:

- залишковий енергоресурс за умови поточної комбінації обігрівачів з черги менше або дорівнює мініимальному залишковому енергоресурсу
- для усіх комбінацій обігрівачів $\Delta P_i \leq \Delta P_{min}$ (початкове значення мініимального

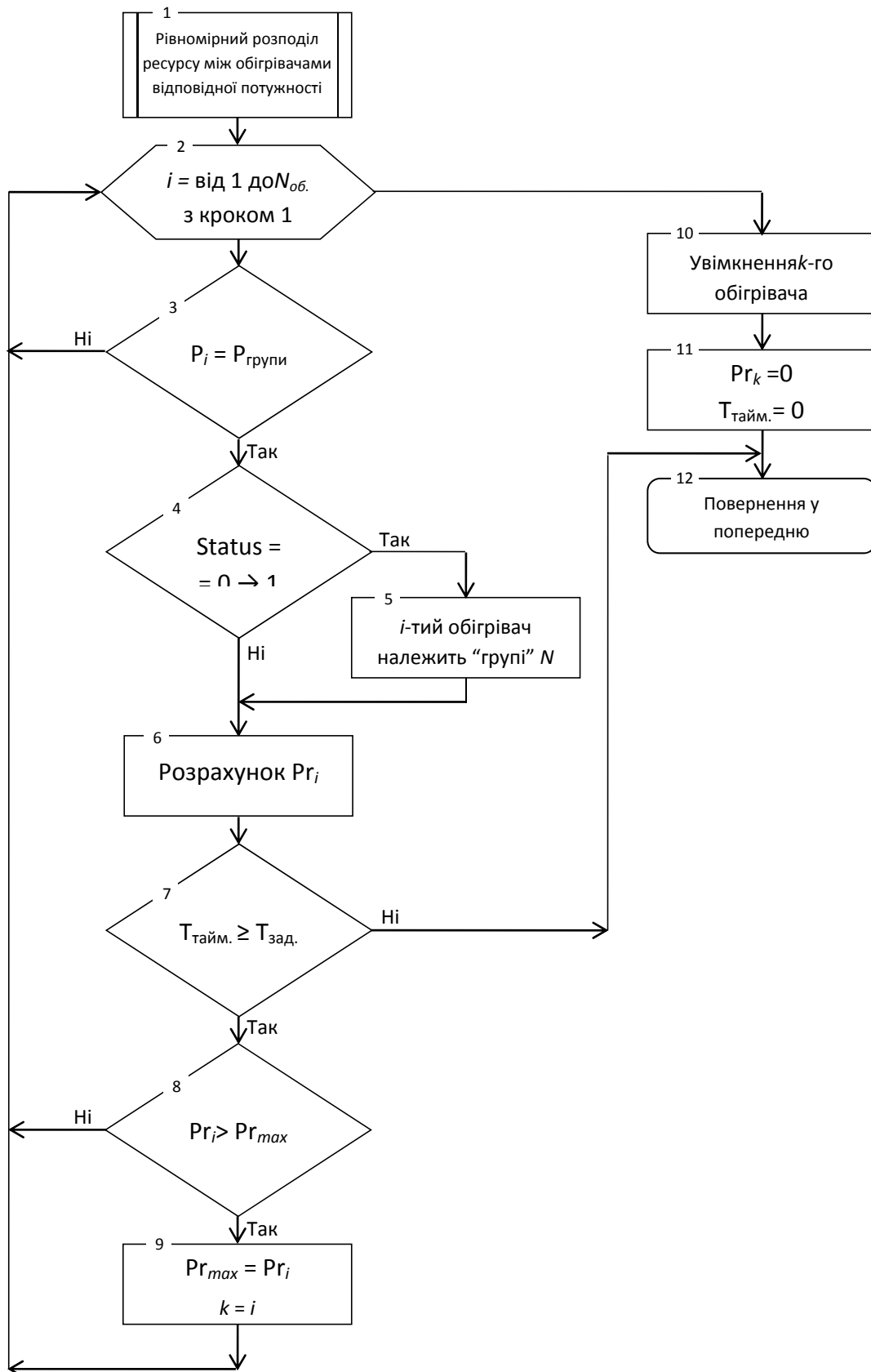


Рисунок 4.4 – Блок-схема алгоритму рівномірного розподілу енергоресурсу між обігрівачами відповідної потужності

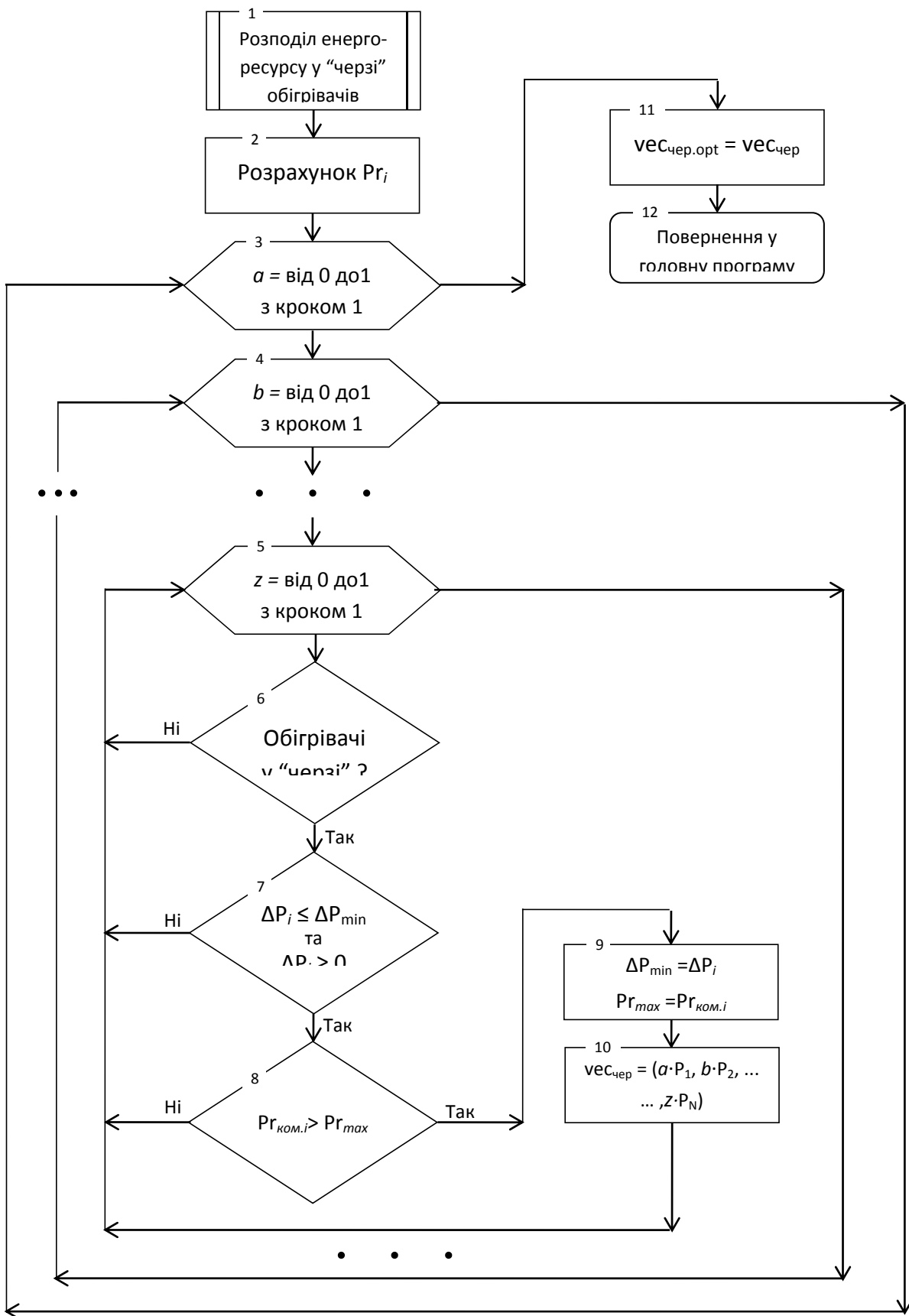


Рисунок 4.5 – Блок-схема алгоритму розподілу енергоресурсу у черзі обігрівачів

залишкового енергоресурсу для усіх комбінацій обігрівачів ΔP_{min} береться рівним $P_{лім}$);

- залишковий енергоресурс за умови поточної комбінації обігрівачів з «черги» є невід'ємним числом ($\Delta P_i \geq 0$).

Залишковий енергоресурс за умови поточної комбінації обігрівачів з черги розраховується за формулою

$$\Delta P_i \leq (P_{лім.} - P_{ін.}) - \left[\sum_{j=1}^{N_{об}} P_{об. j} + (a \cdot P_1 + b \cdot P_2 + \dots + z \cdot P_N) \right].$$

Якщо хоча б одна з умов у блоці 7 не виконується, відбувається перехід до блоку 5, тобто до нової комбінації обігрівачів. У протилежному випадку здійснюється перехід до блоку 8, де порівнюються усереднений пріоритет поточної комбінації обігрівачів з черги ($Pr_{ком. i}$) та максимальний пріоритет для усіх комбінацій обігрівачів (Pr_{max}). Усереднений пріоритет поточної комбінації обігрівачів з черги розраховується за формулою

$$Pr_{ком. i} = \frac{\sum_{j=1}^n Pr_j}{n},$$

де Pr_j – пріоритети обігрівачів з черги, що входять до поточної комбінації; n – кількість обігрівачів, що входять до поточної комбінації.

Якщо усереднений пріоритет поточної комбінації обігрівачів з черги менше за максимальний пріоритет для усіх комбінацій обігрівачів, то відбувається перехід до блоку 5, тобто до нової комбінації обігрівачів. У протилежному випадку виконуються усі умови у блоках 6-8. Це означає, що до поточної комбінації увійшли обігрівачі з черги з максимальним усередненим пріоритетом, за умови вмикання яких буде спостерігатися найменший залишковий енергоресурс. У такому разі робиться перехід до блоку 9, де залишковому енергоресурсу поточної комбінації обігрівачів присвоюється статус мінімального для усіх комбінацій обігрівачів, а усереднений пріоритет поточної комбінації приймається максимальним для усіх комбінацій обігрівачів.

Далі у блоці 10 формується вектор поточної комбінації обігрівачів з черги $vec_{чер.}$:

$$vec_{чер.} = [a \cdot P_1 \quad b \cdot P_2 \quad \dots \quad z \cdot P_N].$$

За умови закінчення перебору усіх можливих комбінацій обігрівачів з активним станом, що потребують підключення до енергомережі, виконується умова виходу із циклу у блоці 3 та відбувається перехід до блоку 11, де формується вектор оптимальної комбінації обігрівачів з черги $vec_{чер.opt}$ за критерієм максимального використання вільного енергоресурсу груп. Після чого відбувається повернення у головну програму (блок 12 на рис. 4.5).

4.2. Розробка моделі системи керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи у математичному пакеті MATLAB

З метою перевірки запропонованого алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи у додатку «Simulink» спеціалізованого математичного пакету «MATLAB» створена модель системи автоматичного керування розподілом енергоресурсу між вісьмома зонами обігріву багатофункціональної будівлі (схема моделі наведена на рис. 4.6).

Кожна зона обігріву являє собою окрему кімнату з одним електричним обігрівачем та додатковим джерелом тепла (як варіант, батарея системи централізованого опалення). Параметри зон обігріву визначені у результаті обробки результатів експериментів із використанням спеціалізованих інструментів математичного пакету «MATLAB» [29] та наведені у табл. 4.1.

Моделювання процесів нагріву та охолодження приміщень відбувається у підсистемах «Heatingzone_1», «Heatingzone_2», ..., «Heatingzone_8» моделі на рис. 4.6, усередині яких реалізована однотипна математична модель, що описує динаміку температур поверхонь обігрівача і кімнати та складає основу методики випробувань опалювальних пристроїв [29]:

$$\begin{cases} \tau_o \cdot \frac{dT_o}{dt} = \frac{P_o}{\sigma_o} - (T_o - T_k); \\ \tau_k \cdot \frac{dT_k}{dt} = (T_o - T_k) \cdot \frac{\sigma_o}{\sigma_k} + \frac{P_{don}}{\sigma_k} - (T_k - T_{в.с.}). \end{cases} \quad (4.3)$$

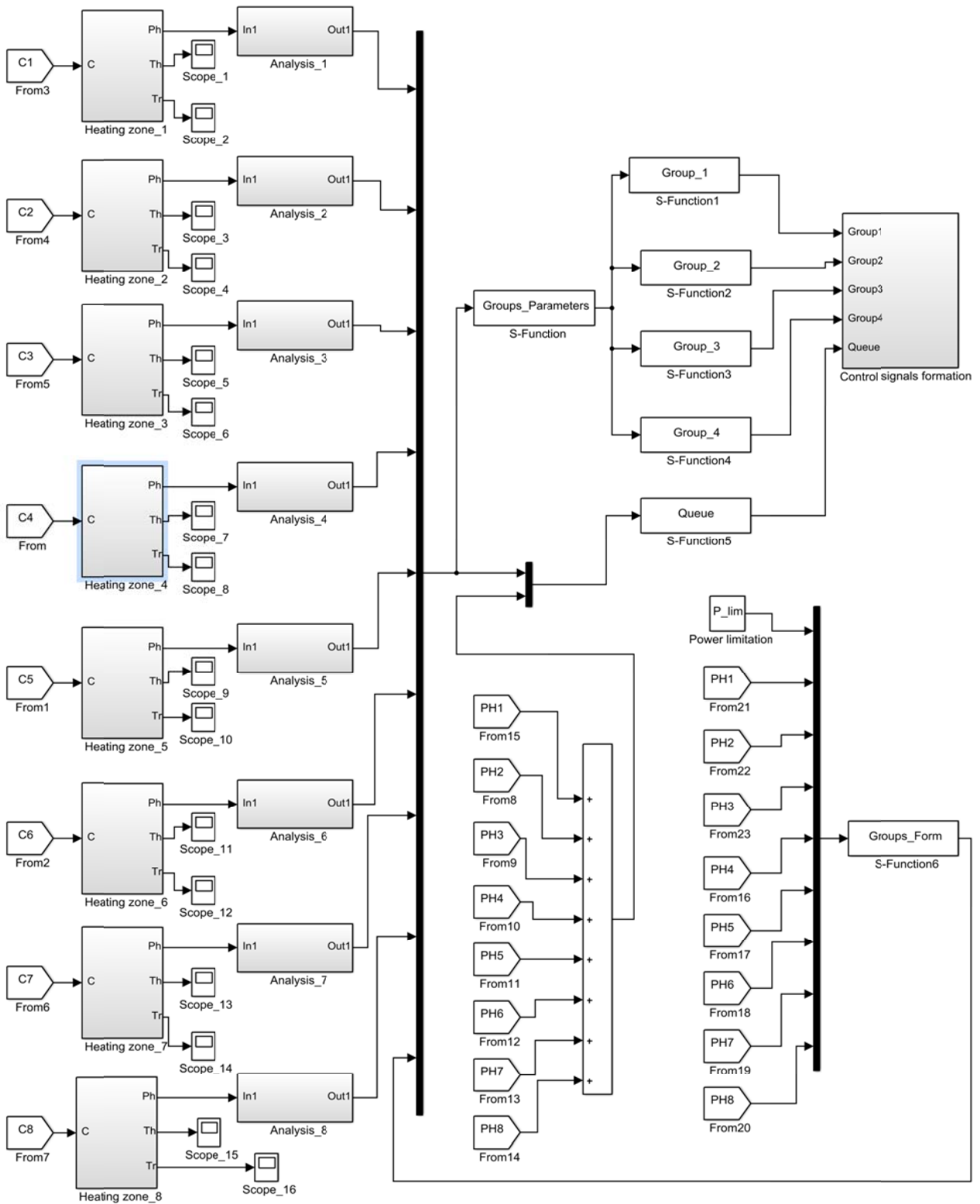


Рисунок 4.6 – Схема моделі системи автоматичного керування розподілом енергоресурсу між вісьмома зонами обігріву багатofункціональної будівлі у додатку «Simulink» математичного пакету «MATLAB»

Таблиця 4.1 – Параметри зон обігріву багатофункціональної споруди

№ зони обігріву	Початкова температура поверхні обігрівача, °С	Початкова температура кімнати, °С	Площа кімнати, м ²	Потужність обігрівача, Вт	Потужність потоку тепла від додаткового джерела, кВт	Коефіцієнт теплопередачі кімнати щодо зовнішнього середовища, Вт/°С	Коефіцієнт теплопередачі обігрівача, Вт/°С	Постійна часу кімнати, хв	Постійна часу обігрівача, хв	Температура зовнішнього середовища, °С
1	17	17	20	1500	2200	100,4	16,8	214,7	17,1	-5
2	17	17	15	1500	1650	75,2	16,7	180,2	17,2	-5
3	17	17	17	1500	1870	85,6	16,77	207,9	17,09	-5
4	16	16	25	2000	2625	125,1	17,6	207,3	17,1	-5
5	16	16	28	2000	2940	140,5	17,62	298,4	17,15	-5
6	15	15	36	2000	3600	179,6	17,7	332,9	17,21	-5
7	19	19	8	800	960	40,4	11,1	133,05	14,3	-5
8	19	19	11	800	1320	55,7	11,02	151,2	14,2	-5

Схема моделі у додатку «Simulink» на основі системи рівнянь (4.3) разом зі схемою моделі двохпозиційного регулятора (термостату обігрівача) представлені з описанням у розділі 3 монографії.

На виході підсистем «Heatingzone_1», ..., «Heatingzone_8» маємо або нуль, або номінальну потужність відповідного обігрівача «Ph», що споживає електроенергію (рис. 4.6). Далі у підсистемах «Analysis_1», «Analysis_2», ..., «Analysis_8» відбувається статистична обробка активних потужностей обігрівачів. При цьому у всіх цих підсистемах використовуються однотипні алгоритми обробки сигналів та, відповідно, однотипні схеми цих алгоритмів у додатку «Simulink» математичного пакету «MATLAB» (рис. 4.7).

У верхній частині схеми на рис. 4.7 за допомогою S-функцій «Period» та «Max_value» визначається період зміни у часі активної потужності обігрівача. У середній частині схеми на рис. 4.7 за допомогою блоку «Consumptiontime» та S-функції «Max_value» визначається час, протягом якого обігрівач споживав електроенергію. Нижня частина схеми на рис. 4.7 призначена для обчислення пріоритету обігрівача за формулою (4.2).

Таким чином, як результат статистичної обробки активної потужності обігрівача на виході схеми на рис. 4.7 за допомогою мультиплектору (блок «Mux») формується вектор з п'яти параметрів: номінальна потужність обігрівача; період його роботи (коли обігрівач працює у режимі підтримки температури); час, протягом якого обігрівач споживав електроенергію; стан контактів термостату; пріоритет обігрівача. Усі перелічені параметри використовуються як вхідні дані для алгоритмів визначення оптимальної комбінації одночасно увімкнутих обігрівачів за критерієм максимального використання виділеного енергоресурсу, розподілу енергоресурсу усередині «груп» обігрівачів та у «черзі» обігрівачів.

S-функції «Period» та «Max_value», які використовуються у схемі алгоритмів статистичної обробки активної потужності обігрівача підсистеми «Analysis_» (рис. 4.7), необхідні для визначення, відповідно, періоду та максимального значення вхідного сигналу.

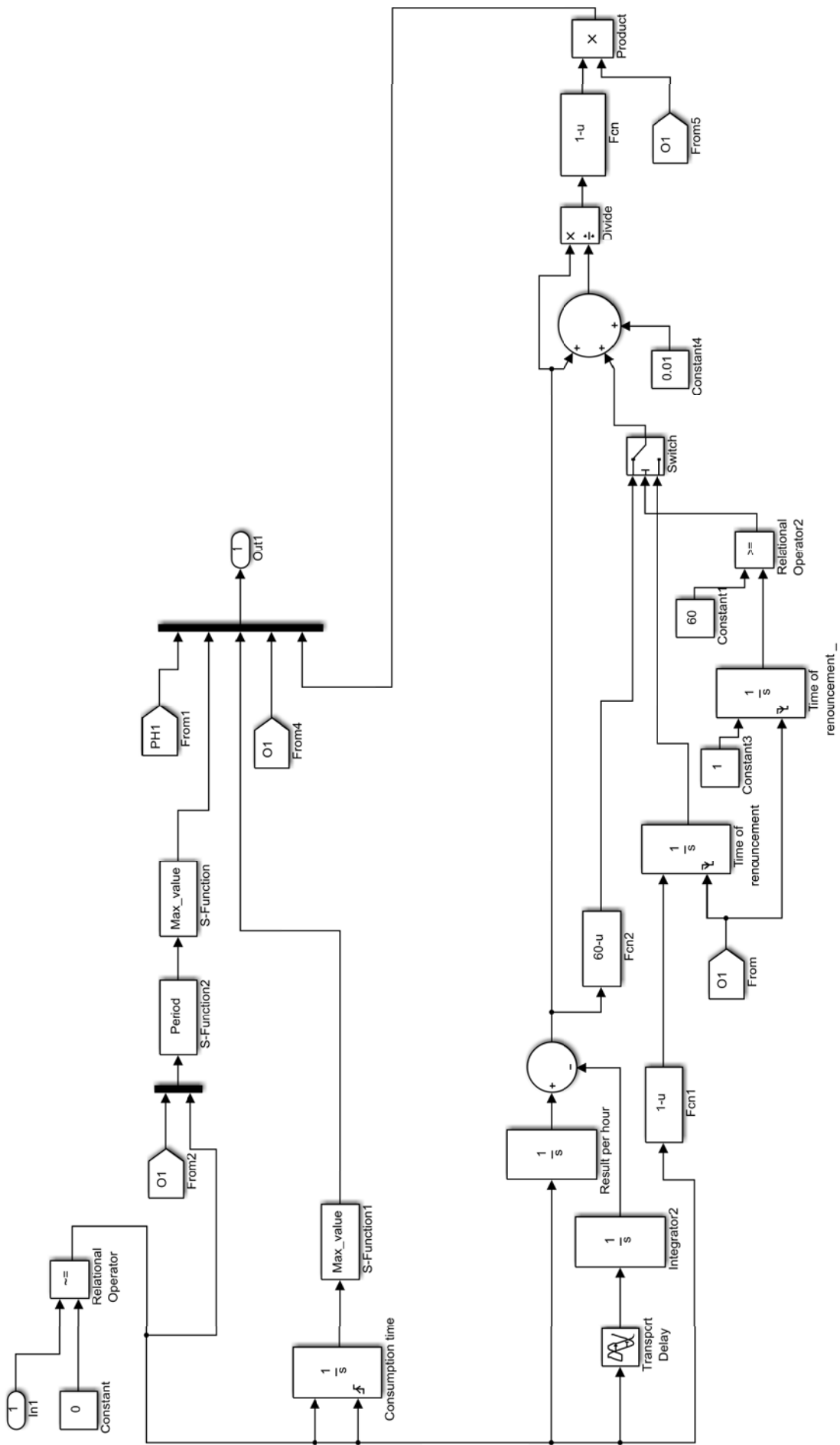


Рисунок 4.7 – Схема алгоритмів статистичної обробки активної потужності обігрівача підсистеми «Analysis_»

Для визначення оптимальної комбінації одночасно увімкнутих обігрівачів за критерієм максимального використання виділеного енергоресурсу згідно з алгоритмом, схема якого показана на рис. 4.2, використовується S-функція «Groups_Form» (блок «S-Function6» на рис. 4.6). У результаті виконання S-функція «Groups_Form» повертає вектор оптимальної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів. Елементи даного вектору задають кількість «груп» через встановлення статусу «активна»/«неактивна» для кожної «групи» у тексті S-функції «Groups_Parameters», що формує загальний синхронізуючий сигнал, а також вектор параметрів «груп» обігрівачів (блок «S-Function» на рис. 4.6). Також для кожної активної «групи» елементи вектору оптимальної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів задають потужність, яку «група» розподіляє.

Вхідними даними для S-функції «Groups_Form», як видно з рис. 4.6, є номінальні потужності обігрівачів PH1, PH2, ..., PH8 та заданий користувачем ліміт за загальною потужністю P_lim. Вхідними даними для S-функції «Groups_Parameters» є вектор результатів статистичної обробки активних потужностей обігрівачів у всіх підсистемах «Analysis_1», «Analysis_2», ..., «Analysis_8», а також вектор оптимальної комбінації одночасно увімкнених обігрівачів.

Вихідним сигналом S-функції «Groups_Parameters» є вектор параметрів «груп» обігрівачів, який складається з наступних елементів: номер «власного» обігрівача кожної «групи» (одночасно встановлює статус «групи»), час споживання енергоресурсу «власним» обігрівачем кожної «групи», стан контактів термостату «власного» обігрівача кожної «групи», поточне значення та період загального синхронізуючого сигналу.

Розподіл енергоресурсу усередині «груп» обігрівачів (схема алгоритму розподілу наведена на рис. 4.3) реалізується за допомогою чотирьох S-функцій з однаковим програмним кодом (але з різними вхідними параметрами) «Group_1», «Group_2», «Group_3» та «Group_4» (рис. 4.6).

Вхідним сигналом S-функції «Group_2» є вектор параметрів «груп» обігрівачів, а вихідним – керуючий сигнал на «власний» обігрівач другої «групи».

Розподіл енергоресурсу у «черзі» обігрівачів (схема алгоритму розподілу наведена на рис. 4.5) реалізується за допомогою S-функції «Queue» (рис. 4.6). Вхідними даними для S-функції «Queue» є вектор результатів статистичної обробки активних потужностей обігрівачів, а також сума номінальних потужностей обігрівачів, що підключені до електромережі на поточний момент. Вихідними даними S-функції «Queue» є вектор керуючих сигналів на усі обігрівачі, що підключені до Smart-конекторів.

Таким чином, кожна S-функція, що керує однією з чотирьох «груп», а також S-функція, що керує «чергою», формують свій власний вектор керуючих сигналів на усі обігрівачі. Однак, при цьому, належність i -го обігрівача до однієї з «груп» унеможливорює появу одиниці на відповідній позиції у векторах керуючих сигналів інших «груп» та «черги». Тому перед подачею керуючого сигналу на окремий обігрівач i -ої зони обігріву (підсистеми «Heatingzone_1», «Heatingzone_2», ..., «Heatingzone_8» на рис. 4.6) необхідно провести об'єднання п'яти векторів керуючих сигналів на обігрівачі за кожним елементом через операцію логічного додавання, а потім представити кожний елемент об'єданого вектору як окремий керуючий сигнал. Ці дії над векторами керуючих сигналів на обігрівачі здійснюються у підсистемі «Controlsignalsformation» (рис. 4.6).

4.3 Дослідження ефективності алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи

Проаналізуємо результати імітаційного моделювання роботи системи керування розподілом енергоресурсу між вісьмома зонами обігріву багатофункціональної будівлі (параметри зон обігріву наведені у табл. 4.1) на основі запропонованого алгоритму розподілення енергоресурсу із синхронізацією роботи обігрівачів за часом.

На початковому етапі обігріву кімнат, з урахуванням того, що обігрівачі були вимкнені тривалий час, розподіл енергоресурсу між обігрівачами буде протікати за алгоритмом рівномірного розподілу енергоресурсу між обігрівачами відповідної потужності (рис. 4.4).

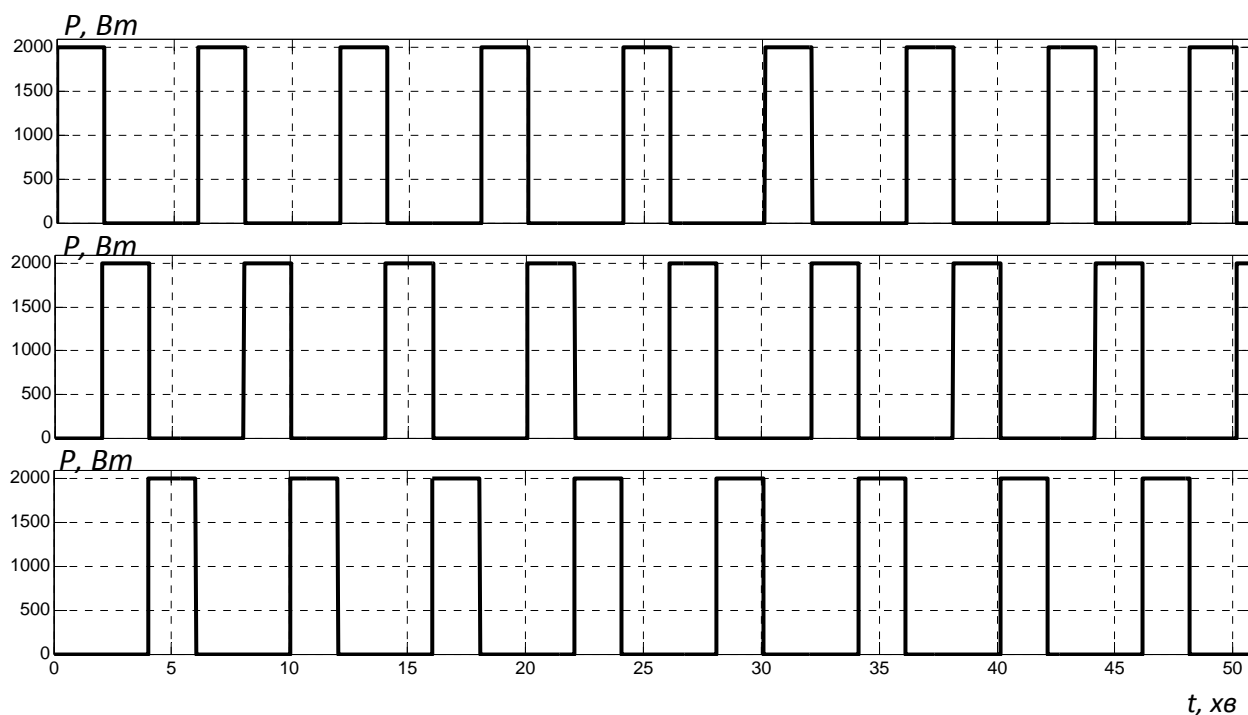


Рисунок 4.8 – Зміна у часі потужностей обігрівачів, що входять до першої «групи» (2 кВт)

На рис. 4.8, як приклад, показаний результат рівномірного розподілу енергоресурсу між обігрівачами потужністю 2 кВт першою «групою» за умови відсутності у «групі» власного обігрівача. Характер роботи обігрівачів, коли кожен з них працює протягом третини періоду (прийнятий 6 хвилин), визначає той факт, що усі три обігрівача споживають енергоресурс тільки першої «групи» та мають однакові початкові пріоритети.

З оглядом на умови обігріву, першим відмовився від ресурсу сьомий обігрівач потужністю 0,8 кВт, який знаходиться у кімнаті з невеликою площиною 8 м². Цей обігрівач увійшов до четвертої «групи» та своїм режимом роботи задав початковий фазовий зсув та період загального синхронізуючого сигналу для усіх власних обігрівачів «груп».

Наступним на 52-й хвилині моделювання відмовився від ресурсу другий обігрівач потужністю 1,5 кВт, який увійшов до другої «групи». Цей обігрівач синхронізував свою роботу з обігрівачем четвертої «групи» за правилом об'єднання вільного ресурсу у часі. Результат синхронізації роботи власних обігрівачів другої та четвертої «груп» представлений на рис. 4.9, де потужність обігрівача другої «групи» показана пунктирною лінією. Із рис. 4.9 ми бачимо, що починаючи з 73-ї хв. моделювання, обігрівачі потужністю 0,8 та 1,5 кВт починають вмикатися разом, тобто процедура синхронізації зайняла 21 хвилину.

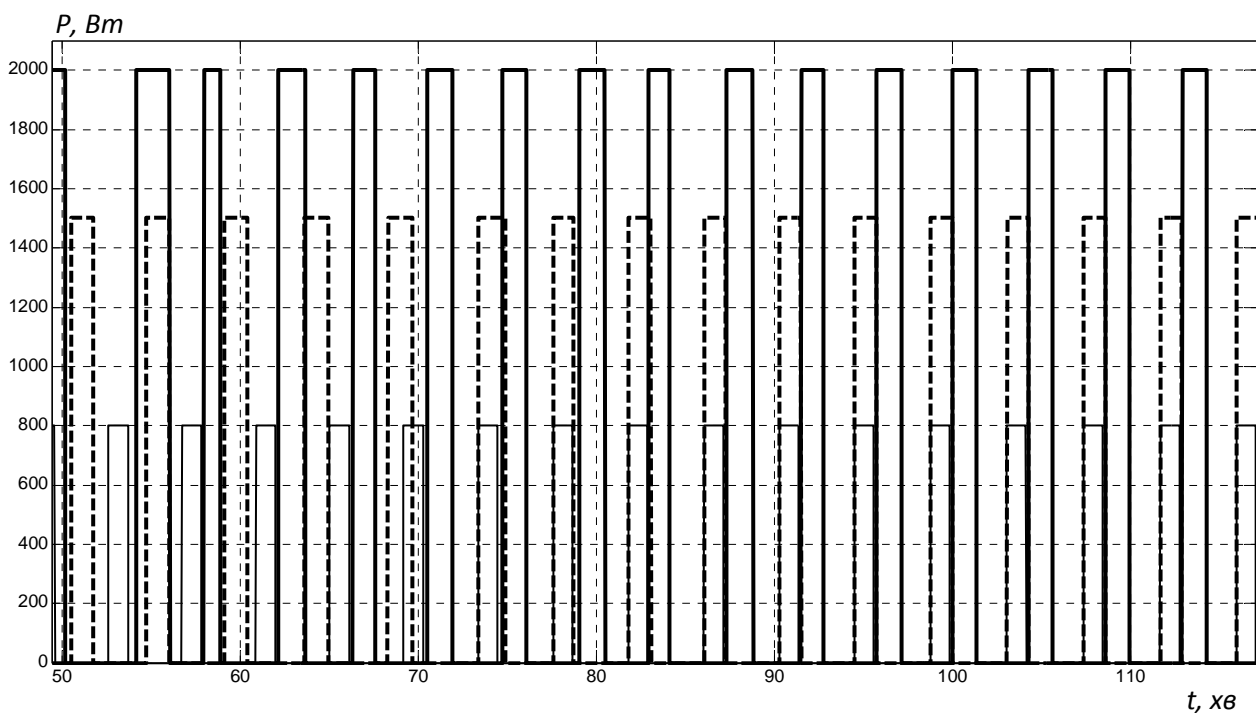


Рисунок 4.9 – Зміна у часі потужностей обігрівачів із першої (2 кВт), другої (1,5 кВт) та четвертої (0,8 кВт) «груп» за умови синхронізації їх роботи

Також на рис. 4.9 показана синхронізація роботи обігрівача потужністю 2 кВт, що відмовився від енергоресурсу та увійшов до «першої» групи на 59-й хвилині моделювання, з обігрівачем другої «групи» потужністю 1,5 кВт за правилом розділення вільного ресурсу у часі. З рис. 4.9 видно, що процедура синхронізації тривала 29 хвилин, та починаючи з 88 хвилини увімкнення обігрівача потужністю 2 кВт відбувається тоді, коли вимикається обігрівач потужністю 1,5 кВт.

На рис. 4.10 ми можемо простежити, як примусове затягування у часі вмикання обігрівачів «груп» з метою синхронізації їх роботи позначається на середній температурі поверхонь обігрівачів.

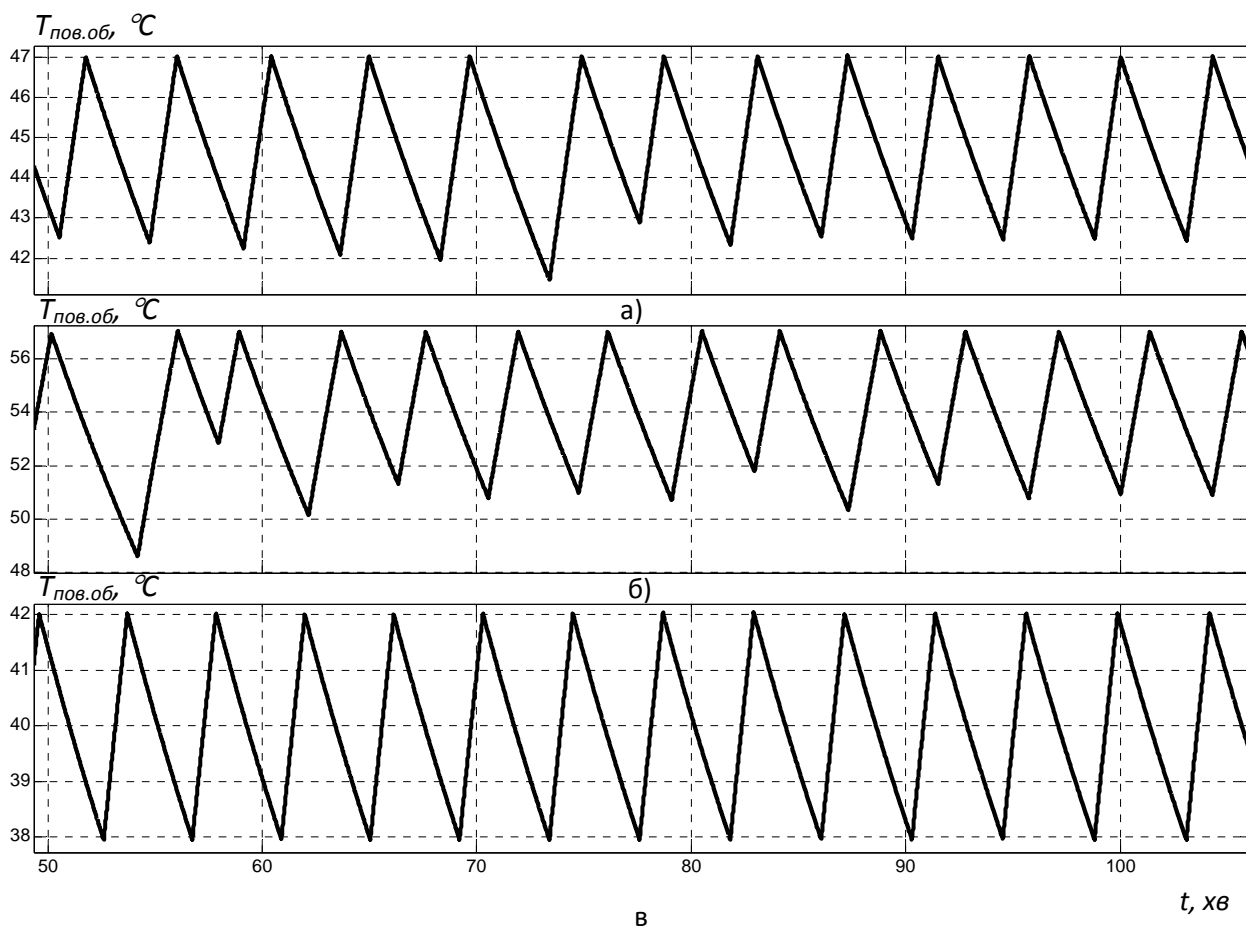


Рисунок 4.10 – Зміна у часі температури поверхні: а – II-го обігрівача; б – IV-го обігрівача; в – VII-го обігрівача за умови синхронізації їх роботи

Зменшення середньої температури поверхні не буде тільки в одного обігрівача «груп», який задає загальний період для усіх інших обігрівачів. Для нашого випадку це сьомий обігрівач, температура поверхні якого коливається у межах від 38 до 42°C із середнім фактичним значенням 40°C, що дорівнює уставці (рис. 4.10, в). Температура поверхні другого обігрівача потужністю 1,5 кВт після синхронізації змінюється у межах від 42,5 до 47°C із середнім фактичним значенням 44,75°C (рис. 4.10, а). Враховуючи те, що уставка дорівнює 45°C, маємо відносне відхилення від заданого значення температури поверхні обігрівача 0,55%. У свою чергу, температура поверхні четвертого

обігрівача потужністю 2 кВт після синхронізації коливається у межах від 51 до 57°C із середнім фактичним значенням 54°C (рис. 4.10, б). Враховуючи те, що уставка дорівнює 55°C, маємо для четвертого обігрівача відносне відхилення від заданого значення температури його поверхні 1,8%.

Таким чином, синхронізація роботи обігрівачів у «групах» через затримування вмикання обігрівачів для нашого випадку призводить до досить незначного зменшення температури поверхонь обігрівачів (до 3 %), що майже не позначається на якості забезпечення заданого температурного режиму у зонах обігріву.

Проаналізуємо закономірності зміни у часі сумарних потужностей обігрівачів у «групах» та у «черзі». На рис. 4.11 представлена динаміка сумарних потужностей обігрівачів у «групах» та у «черзі» після синхронізації роботи усіх обігрівачів у «групах». Із рис. 4.11, ми бачимо, що зміна у часі сумарної потужності обігрівачів у «групах» є періодичним сигналом з присутністю інтервалів часу, коли сумарна потужність дорівнює нулю (біля 25% періоду). Це є передбачуваним наслідком процесу синхронізації роботи обігрівачів «груп», коли тривалості їх увімкнених та вимкнених станів є незмінними величинами на кожному новому періоді.

На відміну від сумарної потужності обігрівачів у «групах», зміна у часі сумарної потужності обігрівачів у «черзі» не є періодичним сигналом з передбачуваною та незмінною формою (рис. 4.11, б). Але можна простежити, що найбільші значення сумарна потужність обігрівачів у «черзі» має тоді, коли сумарна потужність обігрівачів у «групах» дорівнює нулю. Ця закономірність цілком відповідає суті запропонованого алгоритму розподілу енергоресурсу серед обігрівачів у «черзі» (рис. 4.5).

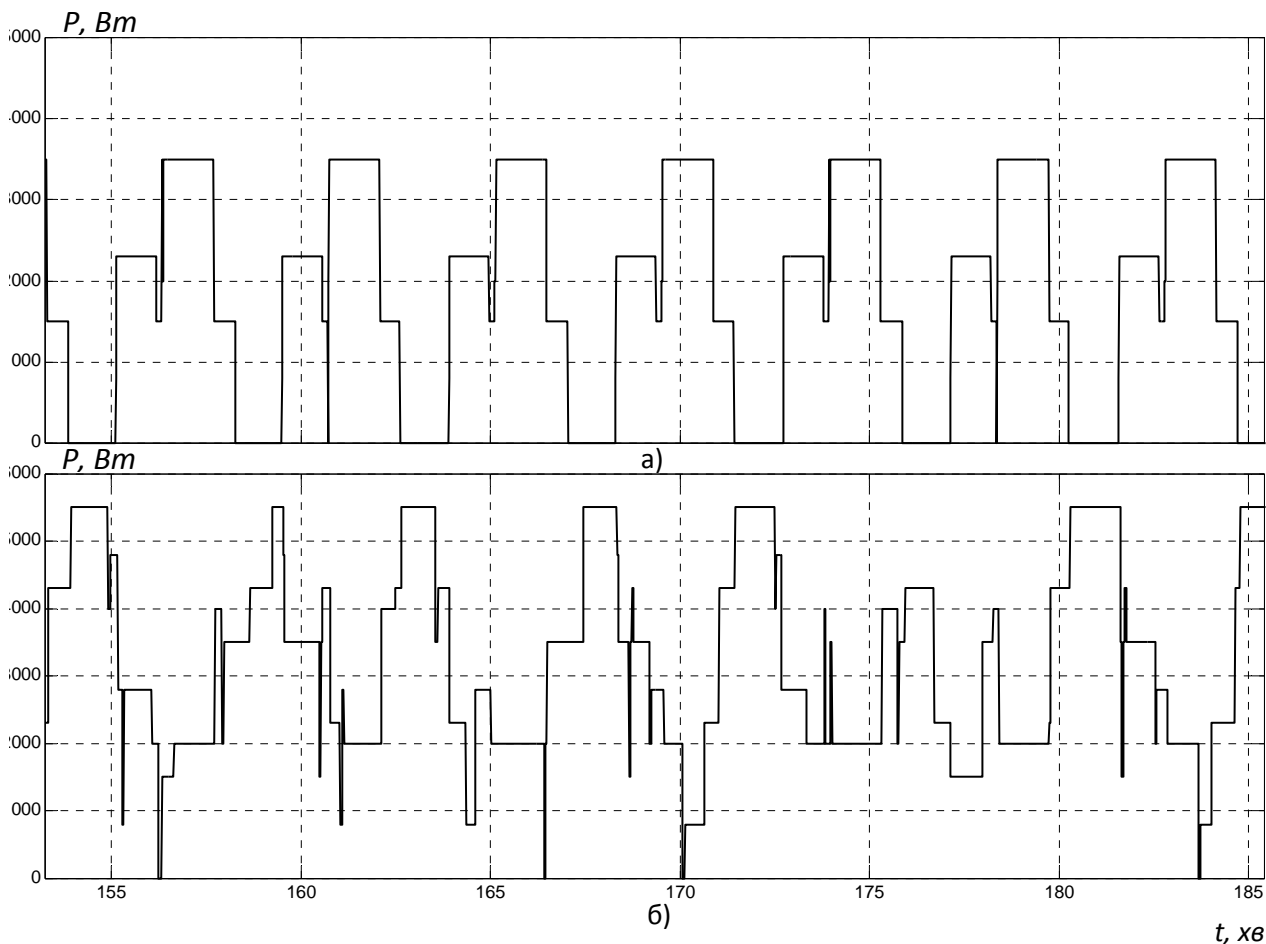


Рисунок 4.11 – Зміна у часі: а – сумарної потужності обігрівачів у «групах»; б – сумарної потужності обігрівачів у «черзі»

Також проаналізуємо зміну у часі сумарної потужності усіх обігрівачів (рис. 4.12). Ми бачимо, що у динаміці сумарної потужності мають місце короткочасні перевищення допустимого ліміту 6 кВт, однак їх тривалість не більше 2 секунд. Це пов'язано з тим, що рішення про вмикання або вимикання обігрівача із «черги» приймається на основі інформації про вмикання або вимикання одного з обігрівачів у «групах», яка надходить із незначним запізненням (крок моделювання у даному випадку прийнятий 1 с). Також із рис. 4.12 та на основі статистичної обробки результатів моделювання робимо висновок, що в основному сумарна потужність усіх обігрівачів змінюється у межах від 4 до 6 кВт із середнім значенням 5,2 кВт. Тобто, для розглянутих умов обігріву приміщень застосування запропонованого алгоритму розподілу енергоресурсу призводить до використання виділеного енергоресурсу на 86,7% із 100% максимально можливого.

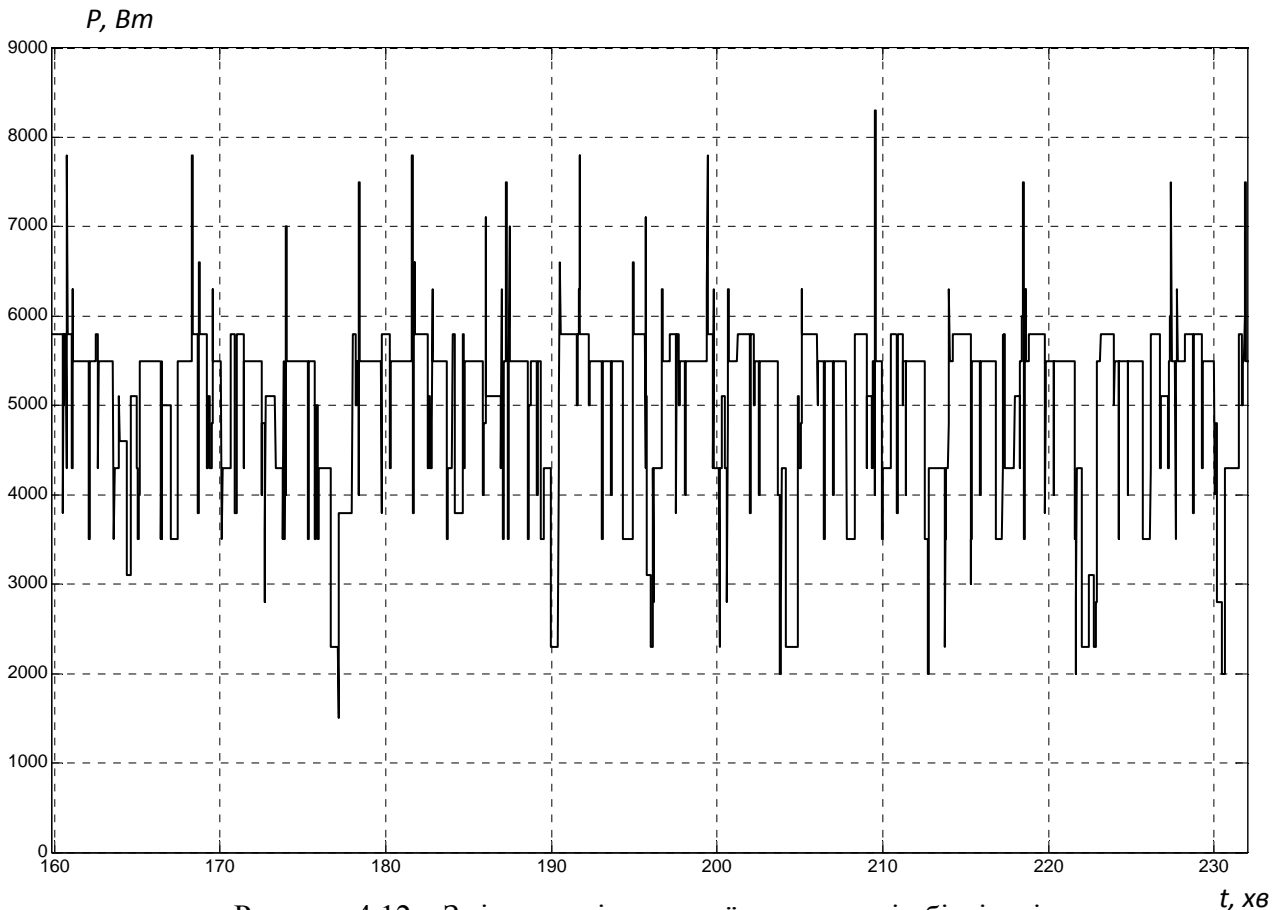


Рисунок 4.12 – Зміна у часі сумарної потужності обігрівачів

Далі на основі рис. 4.13 ми можемо проаналізувати, як обмеження енергоресурсу обігрівачам з «черги» з метою запобігання перевищення ліміту 6 кВт та максимального використання виділеного енергоресурсу позначилося на середній температурі поверхонь обігрівачів. Другий, третій, четвертий та сьомий обігрівачі за результатами нагріву приміщень входять до «груп».

Зміна у часі температур поверхонь цих обігрівачів (рис. 4.13, б, рис. 4.13, в, рис. 4.13, г та рис. 4.13, є) має однаковий характер періодичних коливань з незмінними періодом та шириною діапазону зміни значень температури. Відносне відхилення середньої фактичної температури поверхні обігрівача «групи» від заданого значення при цьому дорівнює: для другого обігрівача 0,55%, для третього – 1,3%, для четвертого – 1,8%, для сьомого – 0%.

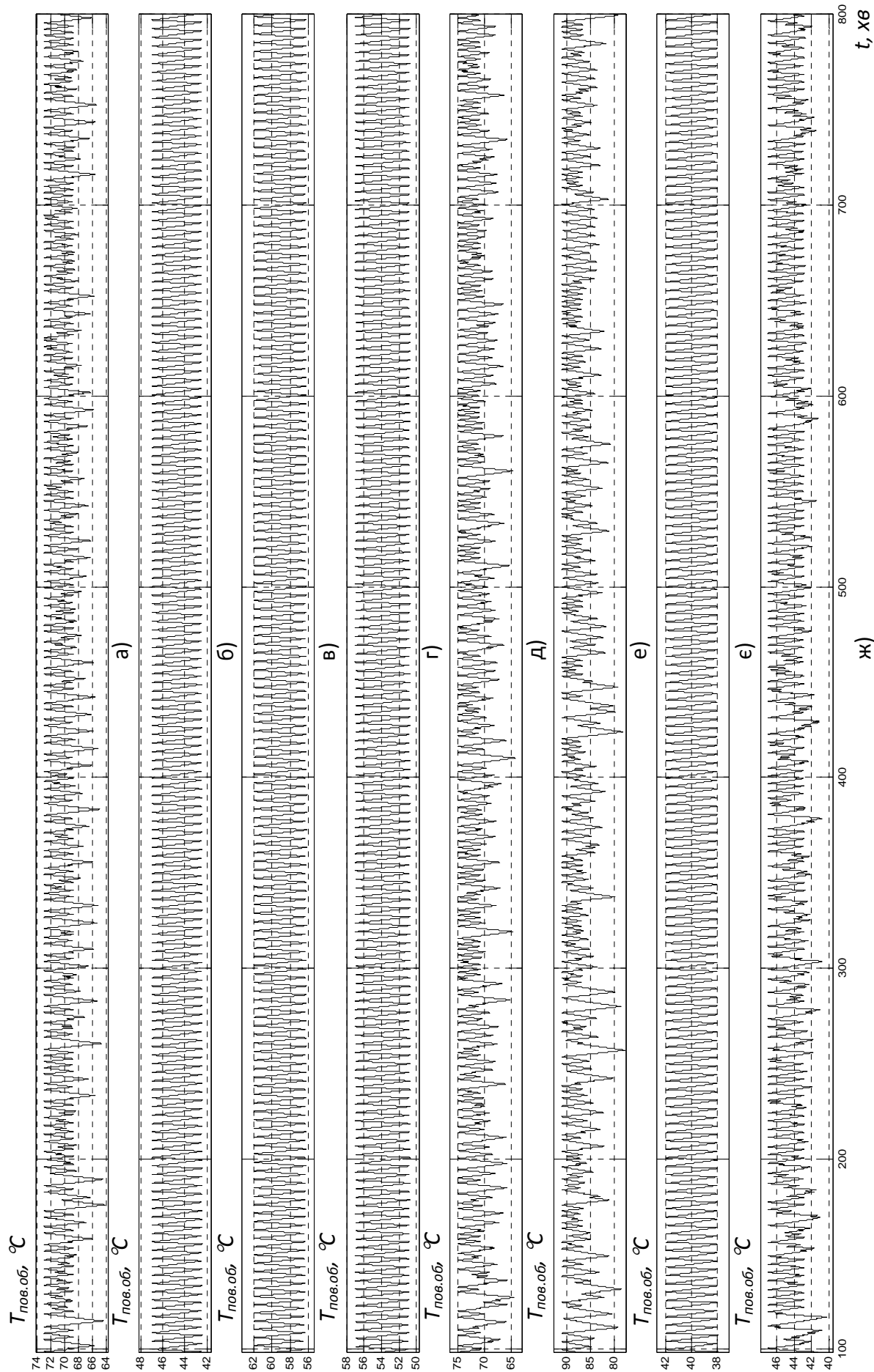


Рисунок 4.13 – Зміна у часі температури поверхні: а – I-го обігрівача; б – II-го обігрівача; в – III-го обігрівача; г – IV-го обігрівача; д – V-го обігрівача; е – VI-го обігрівача; є – VII-го обігрівача; ж – VIII-го обігрівача

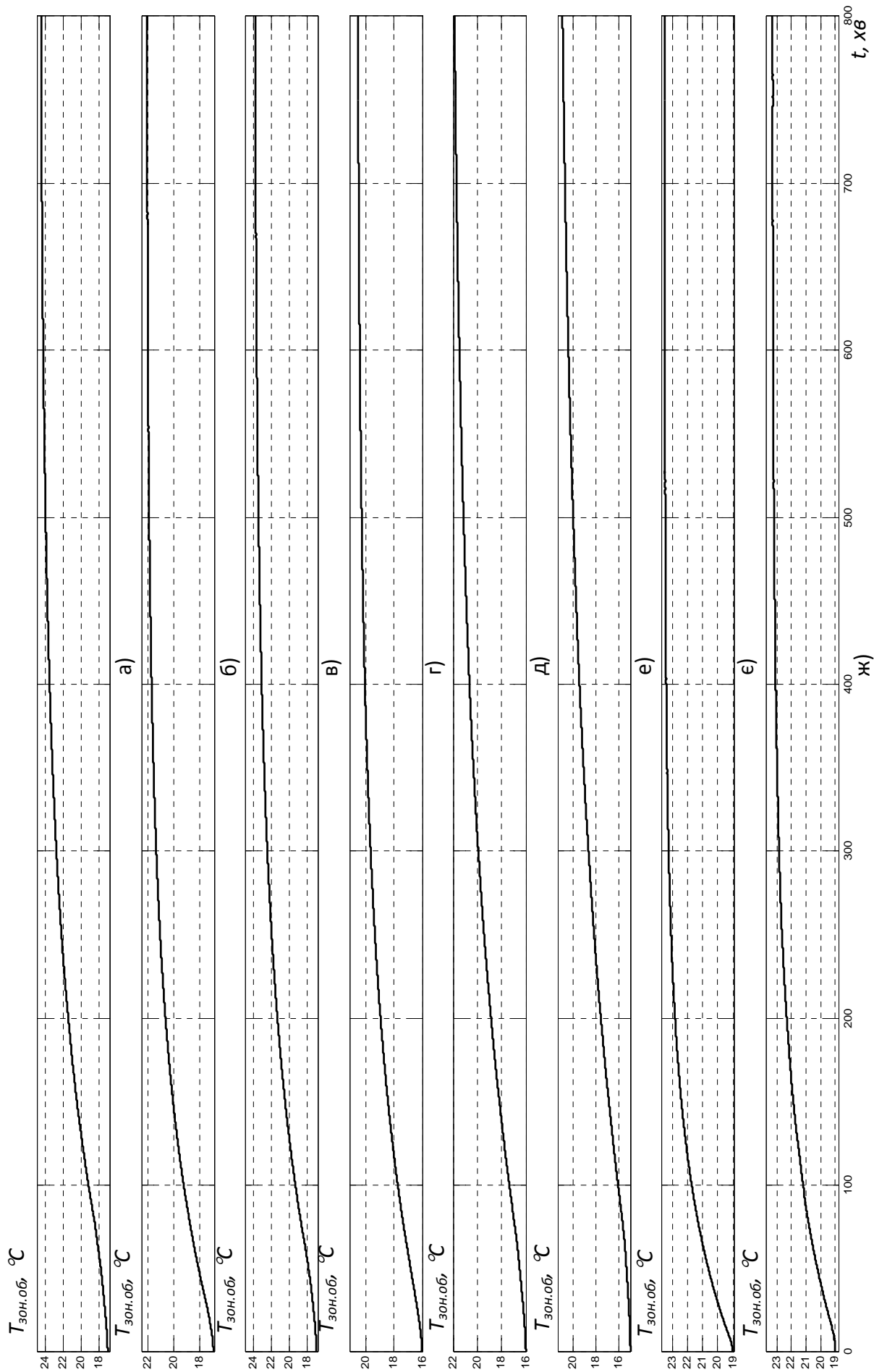


Рисунок 4.14 — Зміна у часі температури: а — I-ї зони обігріву; б — II-ї зони обігріву; в — III-ї зони обігріву; г — IV-ї зони обігріву; д — V-ї зони обігріву; е — VI-ї зони обігріву; є — VII-ї зони обігріву; ж — VIII-ї зони обігріву

На відміну від обігрівачів «груп», які завжди отримують майже весь запрошуваний енергоресурс, зміна у часі температур поверхонь обігрівачів з «черги» має випадковий характер коливань у значно більшому діапазоні зміни значень. Вимикання обігрівачів завжди відбувається за верхньою температурною межею термостату, але увімкнення здійснюється із часовими затримками, які, як видно з рис. 4.13, можуть бути досить значними. У такому разі протягом нетривалих інтервалів часу (до 5 хвилин) спостерігається відхилення фактичних температур поверхонь обігрівачів від заданих значень у сторону зменшення на 5-10°C. Відносне відхилення середньої фактичної температури поверхні обігрівачів з «черги» від заданого значення при цьому дорівнює: для першого обігрівача 1,1%, для п'ятого – 1,7%, для шостого – 2%, для восьмого – 0,9%. Отже, короточасні відхилення фактичних температур поверхонь обігрівачів на 5-10 °C несуттєво зменшують середню температуру поверхонь обігрівачів з «черги» (до 2%).

Таким чином, фактична динаміка нагріву усіх приміщень майже буде відповідати бажаній динаміці, що задається користувачем через настройки термостата, оскільки відносне відхилення фактичних середніх температур поверхонь обігрівачів від заданих значень не перевищує 2%.

На рис. 4.14 показана фактична динаміка нагріву усіх приміщень. Із рис. 4.14, а, рис. 4.14, б та рис. 4.14, в ми бачимо, що швидкість нагріву приміщень обігрівачами потужністю 1,5 кВт майже однакова для усіх трьох зон обігріву. Той самий висновок можна зробити і для зон обігріву з обігрівачами потужністю 0,8 кВт (рис. 4.14, є, ж). До того ж, у сьомій та восьмій зонах обігріву спостерігається максимальна швидкість нагріву приміщень, що пов'язано з невеликим розміром цих приміщень. Найбільш повільний нагрів, приблизно з однаковою швидкістю, має місце у четвертій та шостій зонах обігріву, що зумовлено значними площинами приміщень та відповідними настройками термостатів. Швидкість нагріву приміщення у п'ятій зоні обігріву приблизно на 15% більше у порівнянні з четвертою та шостою зонами.

Таким чином, зробимо наступні висновки:

– для запропонованого алгоритму розподілення енергоресурсу синхронізація роботи обігрівачів за часом у «групах» в залежності від періоду загального синхронізуючого сигналу та умов обігріву відбувається протягом 5-30 хвилин. Це означає, що розподілення енергоресурсу за даним алгоритмом буде ефективним у тому випадку, якщо період зміни ліміту за загальною потужністю, що виділяється для обігрівачів, та період зміни умов обігріву приміщень будуть щонайменш у півтора рази більше часу синхронізації роботи обігрівачів;

– дослідження запропонованого алгоритму розподілення енергоресурсу із синхронізацією роботи обігрівачів за часом на основі імітаційної моделі системи керування розподілом енергоресурсу показали, що алгоритм забезпечує бажану динаміку нагріву приміщень, оскільки відносне відхилення фактичних середніх температур поверхонь обігрівачів від заданих значень не перевищує 2%. При цьому використання виділеного енергоресурсу відбувається на рівні 86,7% із 100% максимально можливого.

4.4 Результати моделювання процесів розумного теплового поля, керованого коаліційними групами

За об'єкт дослідження прийнята трикімнатна квартира, план якої наведений на рис. 3.10. Теплофізичні параметри квартири такі ж самі, як було розглянуто в главі 3. З урахуванням теплофізичних параметрів, технологічна схема квартири як об'єкта дослідження наведена на рис. 3.10. Моделювання процесів нагріву та охолодження зон обігріву відбувається у підсистемах «Heating zone_1», ..., «Heating zone_4» моделі, усередині яких реалізована однотипна математична модель, що описує динаміку температур поверхонь обігрівача і кімнати та складає основу методики випробувань опалювальних пристроїв [30]. На виході підсистем «Heating zone_1», ..., «Heating zone_4» маємо або нуль, або номінальну потужність відповідного обігрівача «Ph», що споживає електроенергію. Далі у підсистемах «Analysis_1», ..., «Analysis_4» відбувається статистична обробка активних потужностей обігрівачів. При

цьому у всіх цих підсистемах використовуються однотипні алгоритми обробки сигналів.

Таким чином, як результат статистичної обробки активної потужності обігрівача формується вектор з п'яти параметрів: номінальна потужність обігрівача; період його роботи (коли обігрівач працює у режимі підтримки температури); час, протягом якого обігрівач споживав електроенергію; стан контактів термостату; пріоритет обігрівача. Усі перелічені параметри для чотирьох обігрівачів, а також ліміт за потужністю на обігрів квартири використовуються як вхідні дані для функції формування груп, що реалізована як S-функція «Groups_Parameters» на рис. 4.15. Вихідними даними функції формування груп є номери та параметри обігрівачів, що увійшли до групи (час споживання ресурсу та стан обігрівача), а також вектор оптимальної комбінації обігрівачів за критерієм максимального використання ліміту потужності на обігрів.

Вхідними даними для функцій управління групами обігрівачів, що реалізовані на рис. 4.15 як S-функції «Group_1-4», є вектор параметрів обігрівачів, що увійшли до груп, а вихідним – керуючий сигнал на «власний» обігрівач групи.

Функція управління чергою обігрівачів реалізована як S-функція «Ochered» на рис. 4.15. Її вхідними даними є результати статистичної обробки потужностей обігрівачів, вектор оптимальної комбінації обігрівачів та сумарна поточна потужність, що споживається обігрівачами, які входять до груп. Вихідними даними є керуючі сигнали на обігрівачі у черзі.

Таким чином, кожна S-функція рис. 4.15, що керує однією з чотирьох груп, а також S-функція, що керує «чергою», формують свій власний вектор керуючих сигналів на усі обігрівачі. Однак, при цьому, належність i -го обігрівача до однієї з «груп» унеможливорює появу одиниці на відповідній позиції у векторах керуючих сигналів інших «груп» та «черги». Тому перед подачею керуючого сигналу на окремий обігрівач i -ї зони обігріву (підсистеми «Heating zone_1», ..., «Heating zone_4» на рис. 4.15) необхідно провести

об'єднання п'яти векторів керуючих сигналів на обігрівачі за кожним елементом через операцію логічного додавання, а потім представити кожний елемент об'єданого вектору як окремий керуючий сигнал. Ці дії над векторами керуючих сигналів на обігрівачі здійснюються у підсистемі «Controlsignalsformation» (рис. 4.15).

Блок «Thetotalpowerforheaters» на рис. 4.15 імітує зміну у часі ліміту потужності, що виділяється на електричний обігрів квартири. Фактично це ліміт за потужністю, що виставляється користувачем, але із періодичним його зменшення на випадкову величину через періодичне підключення до електричної мережі інших побутових пристроїв. Тому у якості цього блоку використовується модель імітації випадкової зміни у часі ліміту потужності з випадковим періодом, схема якої наведена на рис. 4.16.

Блок «Діапазон зміни ліміту потужності» на рис. 4.16 задає діапазон зміни ліміту для наших досліджень від 1 до 5 кВт, а блок «Період зміни ліміту потужності» задає випадковий період зміни ліміту для наших досліджень від 5 до 30 хв. Блок «Saturation» обмежує верхню межу зміни ліміту потужності на рівні до 5 кВт, що заданий користувачем (для наших досліджень 3 кВт).

Основою моделі імітації зміни у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири на рис. 4.16 є S-функція «Limit_P».

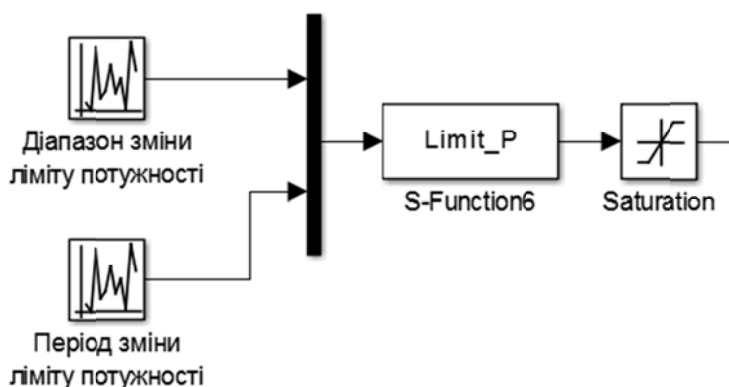


Рисунок 4.16 – Схема моделі імітації зміни у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири

Таблиця 4.2 – Параметри зон обігріву квартири

№ зони обігріву	Початкова температура поверхні обігрівача, °С	Початкова температура кімнати, °С	Площа кімнати, м ²	Потужність обігрівача, Вт	Потужність потоку тепла від додаткового джерела, Вт	Коефіцієнт теплопередачі кімнати щодо зовнішнього середовища, Вт/°С	Коефіцієнт теплопередачі обігрівача, Вт/°С	Постійна на часу кімнати, хв	Постійна на часу обігрівача, хв	Температура зовнішнього середовища, °С
1	20	20	13	1000	70	15,04	11,1	50	17,3	0
2	20	20	20	1500	120	22,56	16,7	55	17,3	0
3	20	20	12	1000	70	13,7	11,1	59	17,3	0
4	20	20	15	1500	200	18,8	16,7	50	17,3	0

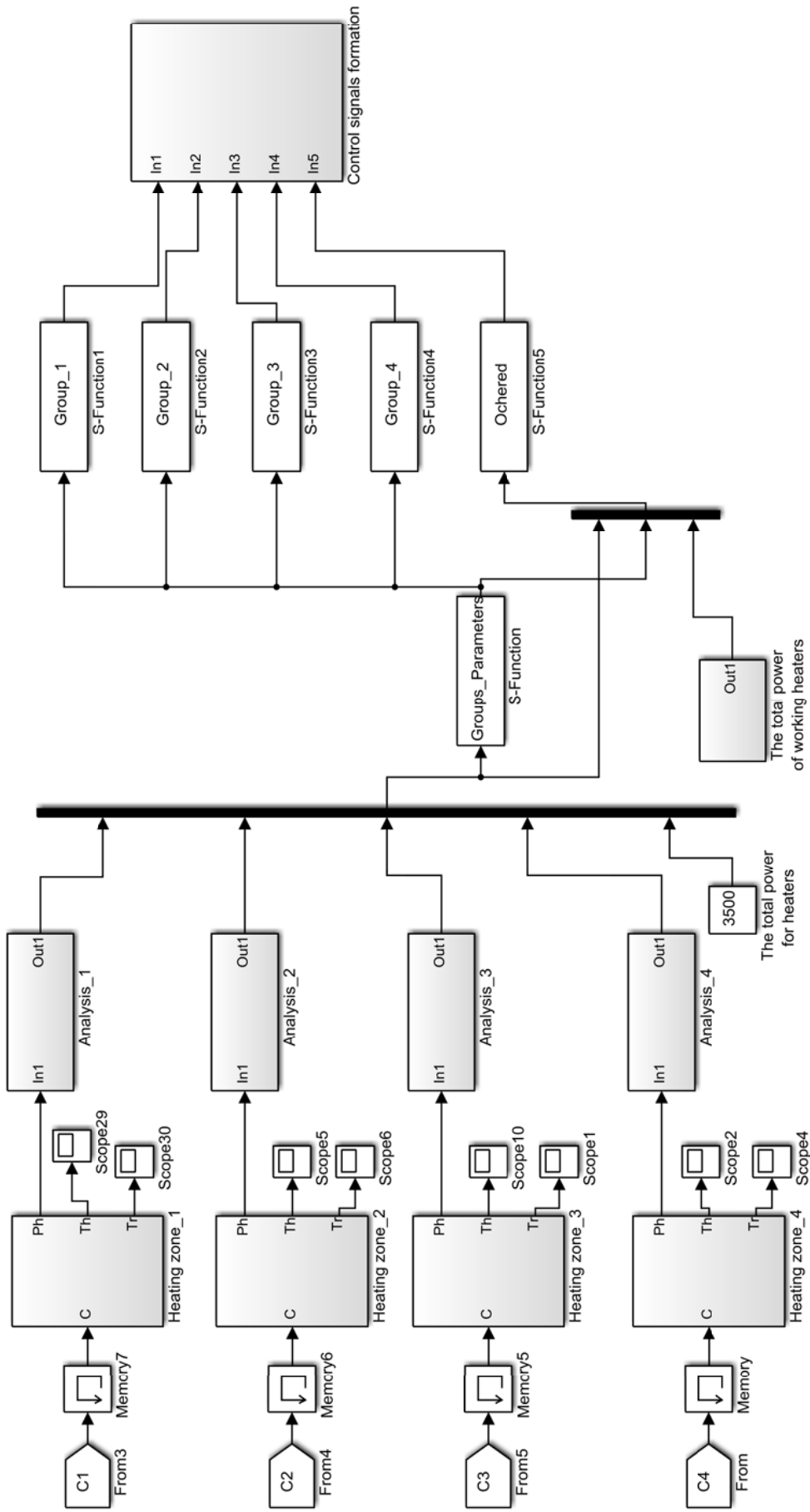


Рисунок 4.15 – Схема імітаційної моделі системи автоматичного керування розподілом енергоресурсу між чотирма зонами обігріву квартири

Нижче на рис. 4.17 – 4.20 наведені основні результати досліджень роботи системи керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації за умови різних ситуацій при обігріві приміщень у математичному пакеті Matlab. Різні ситуації задавалися зміною характеру підключення побутових пристроїв різної потужності протягом часу моделювання, що складає 1440 хв (одна доба). Положення термостатів обігрівачів при цьому не змінювалися та були підібрані таким чином, щоб забезпечувати комфортну температуру у зонах обігріву квартири на рівні 23–24 °С за умови температури зовнішнього середовища 0°С.

Аналіз рис. 4.17 дозволяє зробити висновок щодо відсутності перевищення ліміту потужності, що виділений на електричний обігрів квартири. Короткочасні перевищення ліміту потужності на обігрів тривають 0,01 хв та пов'язані з тим, що система реагує саме на подію перевищення ліміту та перемикає обігрівачі з метою зменшення потужності на обігрів із запізненням, що дорівнює періоду виклику функцій та оновлення змінних у програмному забезпеченні (0,01 хв або 0,6 с).

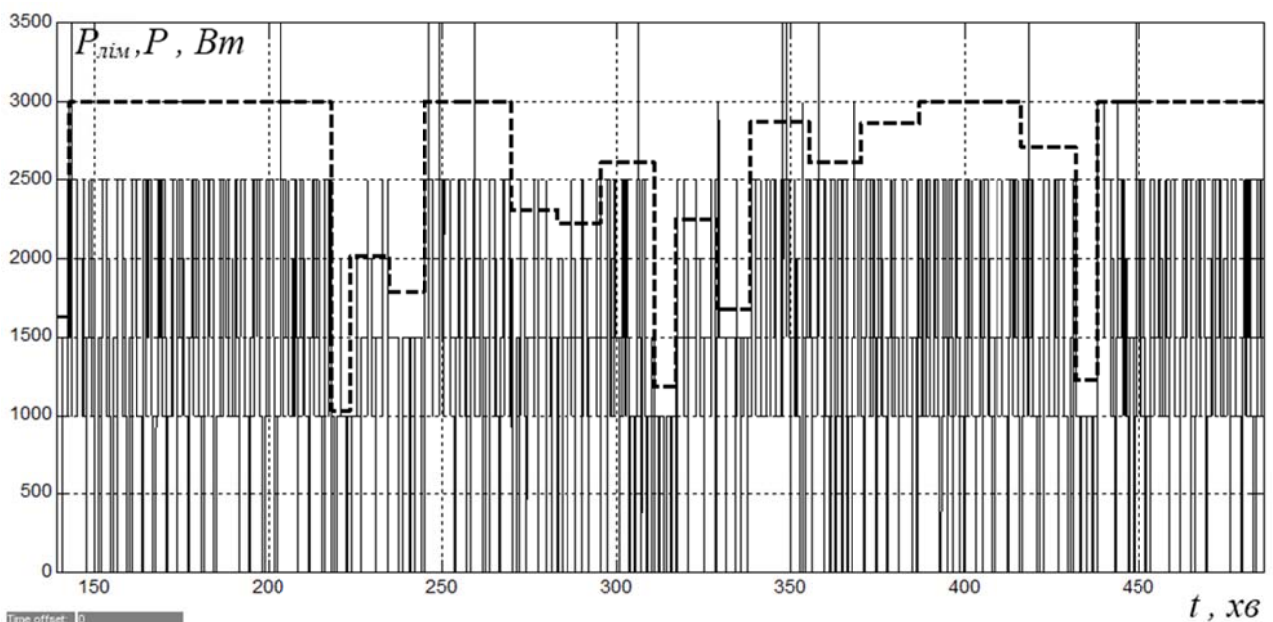


Рисунок 4.17 – Зміна у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири (пунктирна лінія) та сумарної потужності, що споживають обігрівачі (суцільна лінія)

З рис. 4.17 ми також бачимо, що майже на усьому часовому інтервалі моделювання сумарна поточна потужність, що споживається обігрівачами за умови електричного обігріву квартири, не перевищує 2,5 кВт, хоча ліміт за потужністю становить 3 кВт. Присутність неповного використання виділеного ліміту потужності на обігрів квартири пов'язана з тим, що усі обігрівачі вийшли на задані користувачем через термостати температуру й працюють з періодичним самостійним відключенням, а 2,5 кВт потужності вистачає для підтримки комфортних температур у зонах обігріву.

Тобто за результатами досліджень маємо важливий висновок щодо комфортності та ефективності використання користувачем запропонованої системи управління електричним обігрівом. Річ у тому, що запропонований алгоритм передбачає участь користувача у завданні комфортних температур у зонах обігріву через встановлення відповідних положень термостатів. Крім того, користувач має вирішити, який повинен бути ліміт за потужністю на обігрів. Все це робить рекомендовану систему управління електричним обігрівом квартири досить складною для користувача. Тому необхідні певні рекомендації, які дозволять спростити процедуру налаштування роботи системи управління обігрівом користувачем з метою досягнення, з однієї сторони, бажаних температур у зонах обігріву, а з іншої сторони – бажаної кількості споживаної електроенергії на обігрів за умови відсутності перевищення встановленого ліміту потужності.

З оглядом на встановлені закономірності зміни у часі сумарної поточної потужності, що споживається обігрівачами, на рис. 4.17 налаштування роботи системи управління електричним обігрівом квартири має відбуватися у два етапи:

- потрібно встановити ліміт за потужністю на обігрів з певним запасом та після цього з урахуванням інерційності зміни температури у кімнатах провести налаштування положення термостатів таким чином, щоб температура у зонах обігріву була комфортною;

- після того, як фактична температура у зонах обігріву досягла бажаного рівня, проаналізувати графік зміни у часі сумарної поточної потужності, що

споживається обігрівачами. Якщо з графіку буде видно, що сумарна поточна потужність, що споживається обігрівачами, постійно менше за встановлений ліміт потужності (як на рис.4.17), то ліміт можна зменшити до рівня сумарної потужності, що витрачається на електричний обігрів (на рис. 4.17 з 3 до 2,5 кВт).

Рисунок 4.18 дає нам уявлення про роботу груп обігрівачів – ми можемо простежити, які обігрівачі, в залежності від різних ситуацій при обігріві приміщень, потрапляли до кожної групи.

З рис. 4.18 видно, що до першої та другої груп, що керують розподілом потужності 1 кВт, обігрівачі потрапляли, як правило, за умови знаходження ліміту потужності між значеннями 2 та 2,5 кВт. До третьої та четвертої груп, що керують розподілом потужності 1,5 кВт, обігрівачі потрапляли набагато частіше. Це пов'язане з тим, що для виділеного ліміту 3 кВт оптимальна з точки зору максимального використання ліміту комбінація обігрівачів становить два обігрівача по 1,5 кВт. Тому за умови знаходження ліміту потужності на рівні 3 кВт активними були саме третя та четверта групи обігрівачів.

Одним з головних показників того, наскільки вистачає виділеного ліміту потужності на підтримку заданих температур у зонах обігріву, є кількість та величини відхилень температур поверхонь обігрівачів від заданих значень. З рис. 4.19 ми бачимо, що протягом доби на один обігрівач у середньому приходяться 4–5 помітних відхилень фактичної температури поверхні обігрівача від заданого рівня на 10–15°C протягом 5–20 хв. З урахуванням того, що динаміка температури у кімнаті є у 2-3 рази більш інерційною, ніж динаміка температури поверхні обігрівача, відхилення фактичної температури поверхні обігрівача від заданого рівня на 10–15°C протягом 20 хв не має суттєвий вплив на температуру у зоні обігріву.

Рисунок 4.20 підтверджує висновок щодо незначного впливу відхилень температур поверхонь обігрівачів від заданого рівня на 15°C протягом 20 хв на температури у зонах обігріву – ми бачимо, що останні відхиляються від заданих значень не більше, ніж на 2°C протягом 60–90 хв.

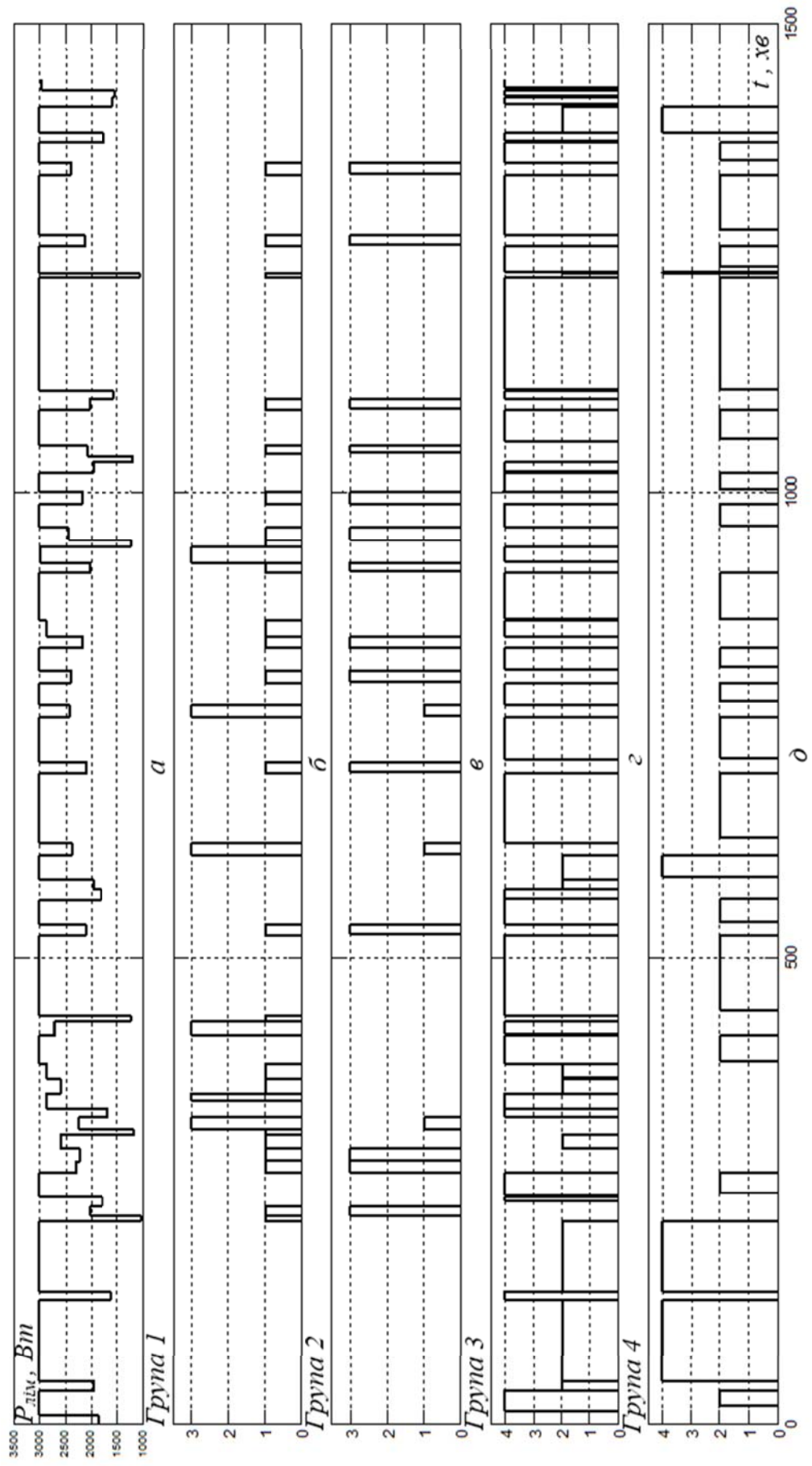


Рисунок 4.18 – Зміна у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири (а) та змінних, які відображують номер обігрівача, що увійшов у першу (б), другу (в), третю (г) або четверту (д) групи

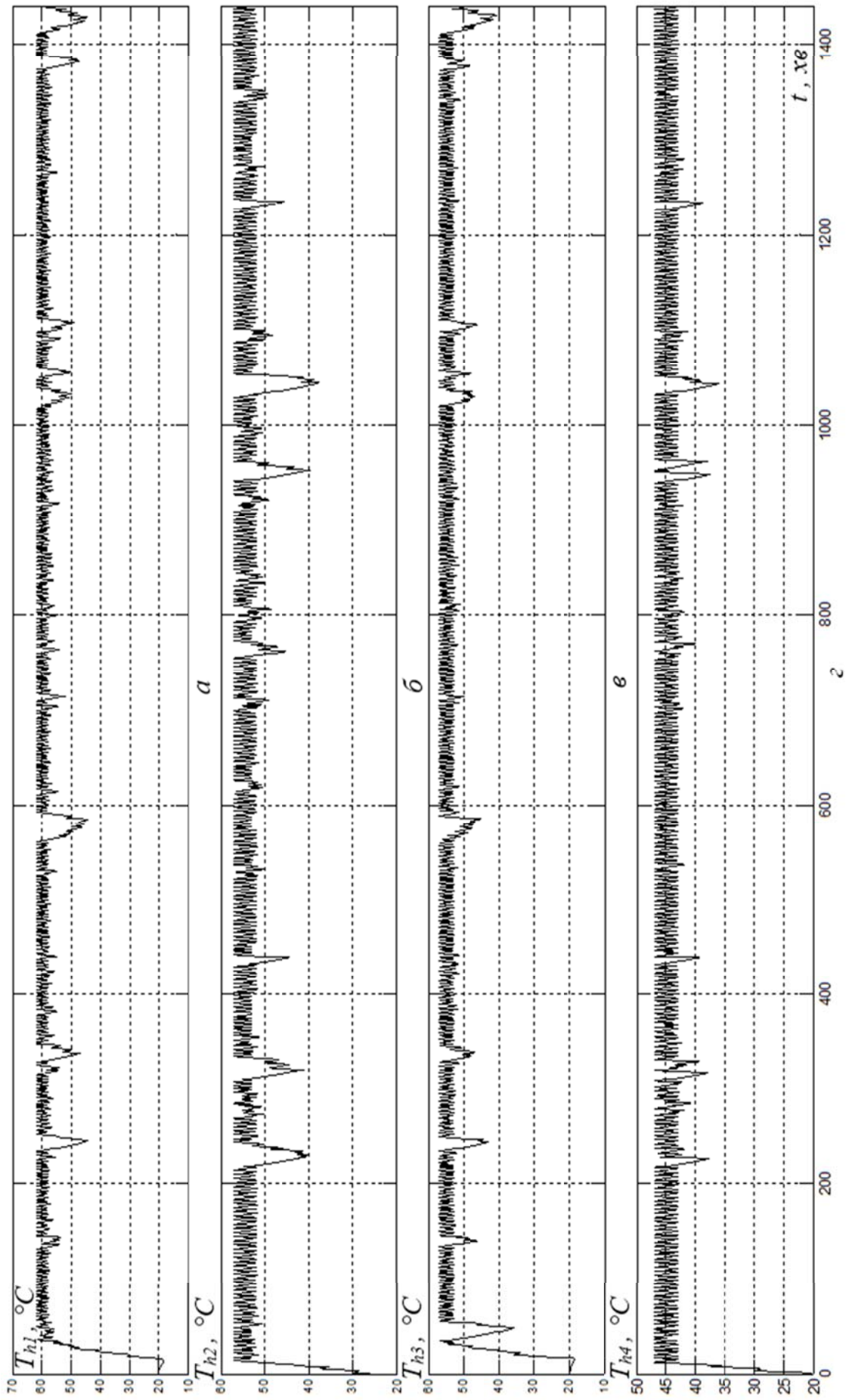


Рисунок 4.19 – Зміна у часі температури поверхні першого (а), другого (б), третього (в) та четвертого (г) обігрівачів

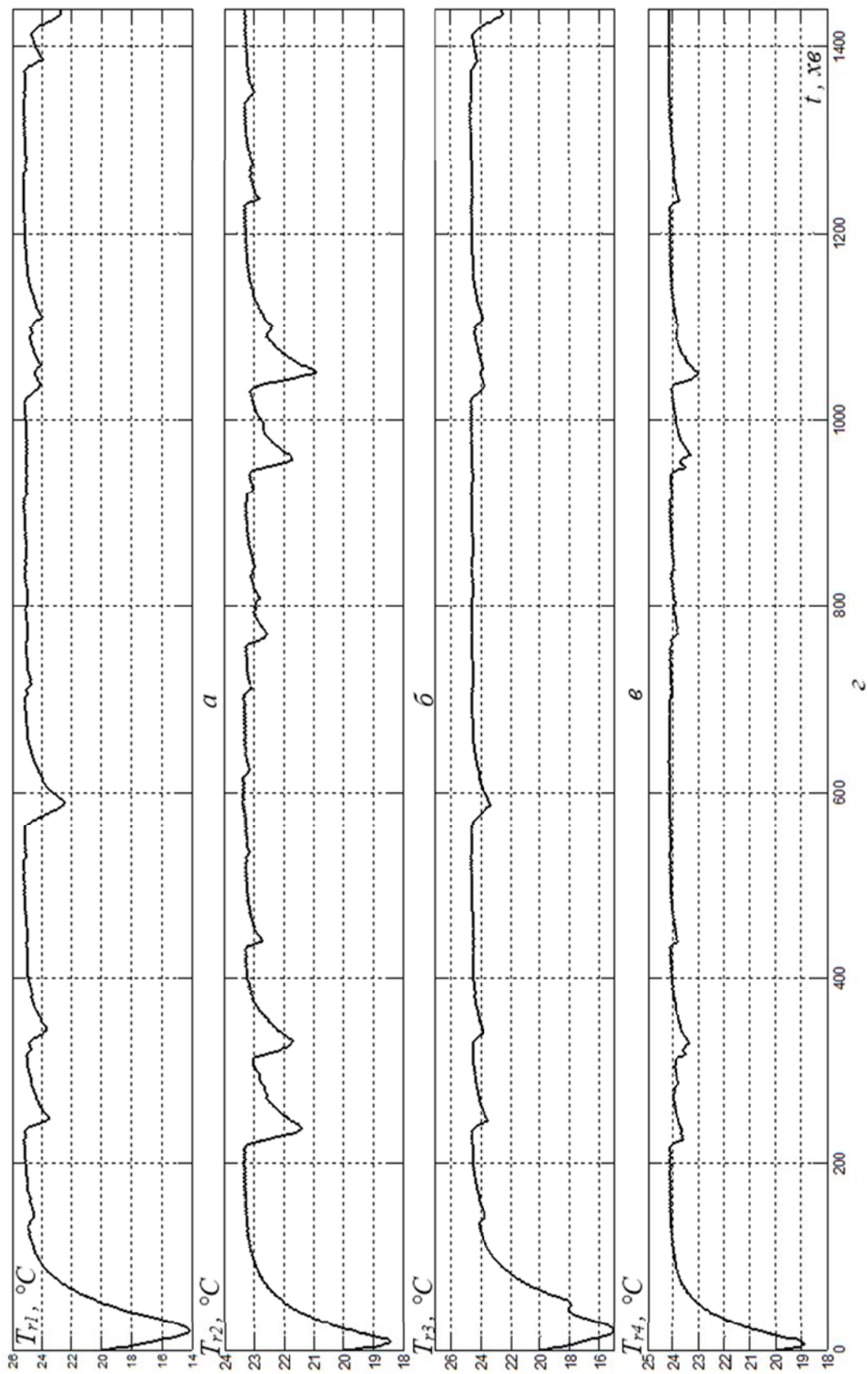


Рисунок 4.20 – Зміна у часі температур у першій (а), другій (б), третій (в) та четвертій (г) зонах обігріву

Отже, з оглядом на отримані результати досліджень можна сформувати ще одну рекомендацію користувачеві запропонованої системи управління електричним опаленням квартири – у часи, коли очікуються часті підключення потужних побутових приладів до електричної мережі та, відповідно, суттєві зменшення ліміту потужності на обігрів, обирати бажані значення температур у зонах обігріву з певним запасом на 1-2°C.

4.5 Дослідження роботи системи керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації за умови різних ситуацій при обігріві приміщень із використанням її експериментального зразку

Дослідження роботи системи керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації за умови різних ситуацій при обігріві приміщень проводилися на основі фізичної моделі розумної енергетичної мережі, що описана у розділі 5, в умовах квартири, план якої наведений у розділі 3 монографії. При цьому протягом доби спостерігалася температура ззовні вночі від -1 до 0°C, протягом дня – від 0 до +1 °C. Ліміт за потужністю встановлений на рівні 2,5 кВт.

Розглянемо результати досліджень роботи системи керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації за умови окремих ситуацій при обігріві приміщень.

1. Перший запуск системи керування обігрівачами, коли жоден обігрівач не входить до групи, а температура їх поверхонь дорівнює температурі у кімнаті.

Рис. 4.23 підтверджує, що в момент запуску системи керування обігрівачами жоден із обігрівачів не входить до груп до 30 хвилини з моменту запуску системи (цей момент прийнятий за початок координат).

Згідно з алгоритмом керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації роботи обігрівачів, до 30 хв. розподіл потужності повинен відбуватися рівномірно з почерговим вмиканням та вимиканням обігрівачів. Причому до 11 хв. почергово вмикаються та вимикаються з періодом 4 хв.

тільки обігрівачі потужністю 1 кВт, оскільки ліміт за потужністю на обігрів становить 1490 Вт, а після 11 хв. аналогічним чином починають працювати обігрівачі потужністю 1,5 кВт, оскільки ліміт збільшується до 2,5 кВт (рис. 4.21).

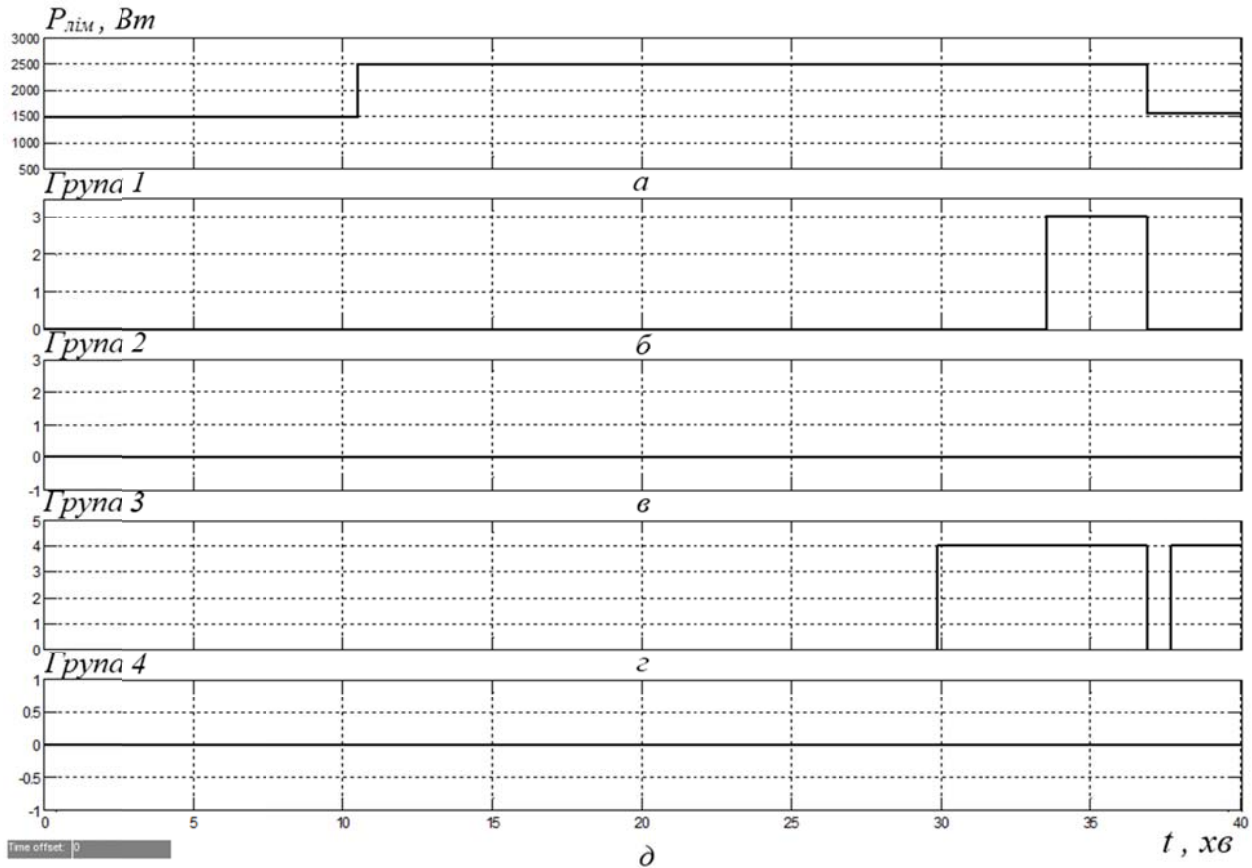


Рисунок 4.21 –Зміна у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири (а) та змінних, які відображують номер обігрівача, що увійшов у першу (б), другу (в), третю (г) або четверту (д) групи

Рисунок 4.20 та 4.21 підтверджують, що робота обігрівачів протягом експерименту відбувалася згідно запропонованому алгоритму.

Обігрівачі потужністю 1 кВт вмикалися та вимикалися по чергово з періодом 4 хв. з моменту запуску системи (рис. 4.20), а обігрівачі потужністю 1,5 кВт почали працювати аналогічним чином з 11 хв. з моменту запуску системи (рис. 4.21).

2. Робота системи керування обігрівачами, коли відбувається синхронізація у часі роботи обігрівачів однакової потужності.

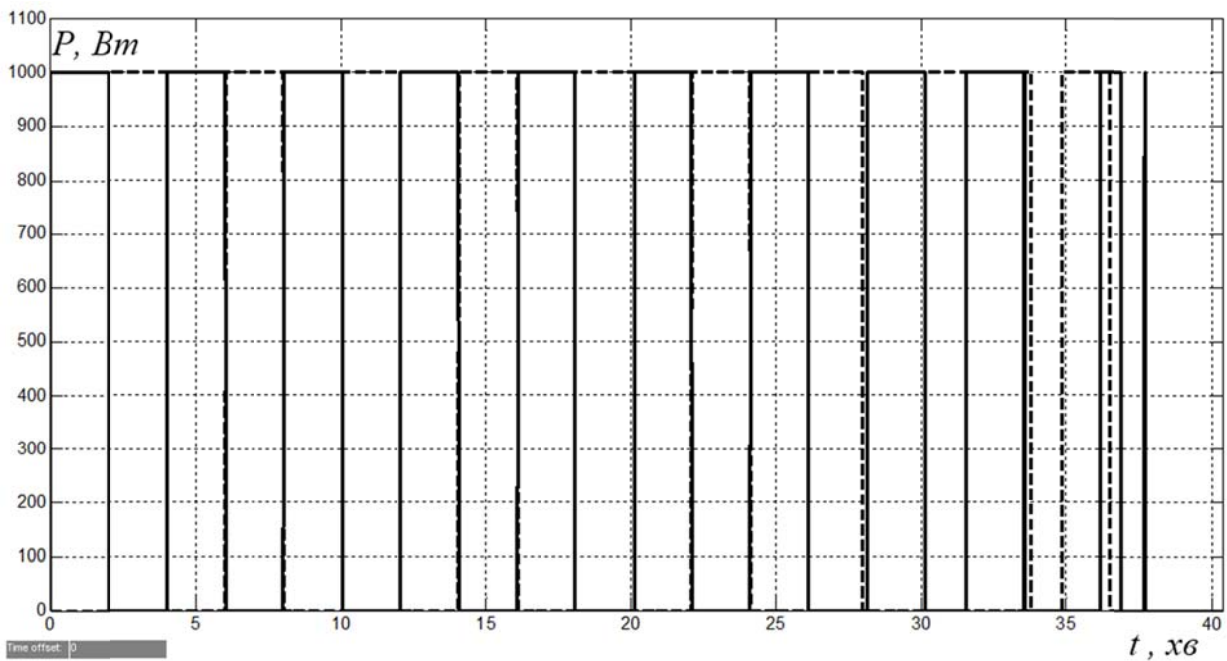


Рисунок 4.22 – Зміна у часі потужності, що споживає перший (пунктирна лінія) та третій (суцільна лінія) обігрівачі

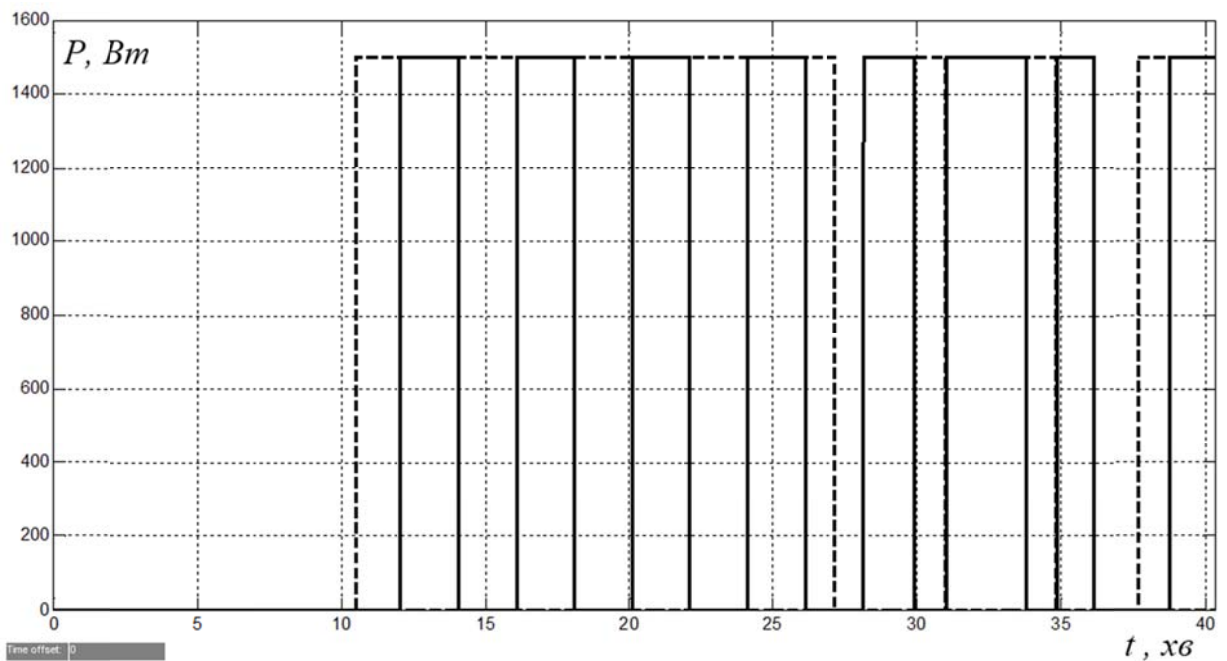


Рисунок 4.23 – Зміна у часі потужності, що споживає другий (пунктирна лінія) та четвертий (суцільна лінія) обігрівачі

З рис. 4.24 видно, що між 356 та 371 хв. експерименту спостерігалась робота системи керування обігрівачами, коли відбувається синхронізація у часі роботи обігрівачів потужності 1 кВт. З рис. 4.24, б, та рис. 4.24, в на області графіку, що виділена заливкою, видно, що протягом цього інтервалу часу

обігрівачі входять до першої та другої груп, що керують розподілом потужності 1 кВт.

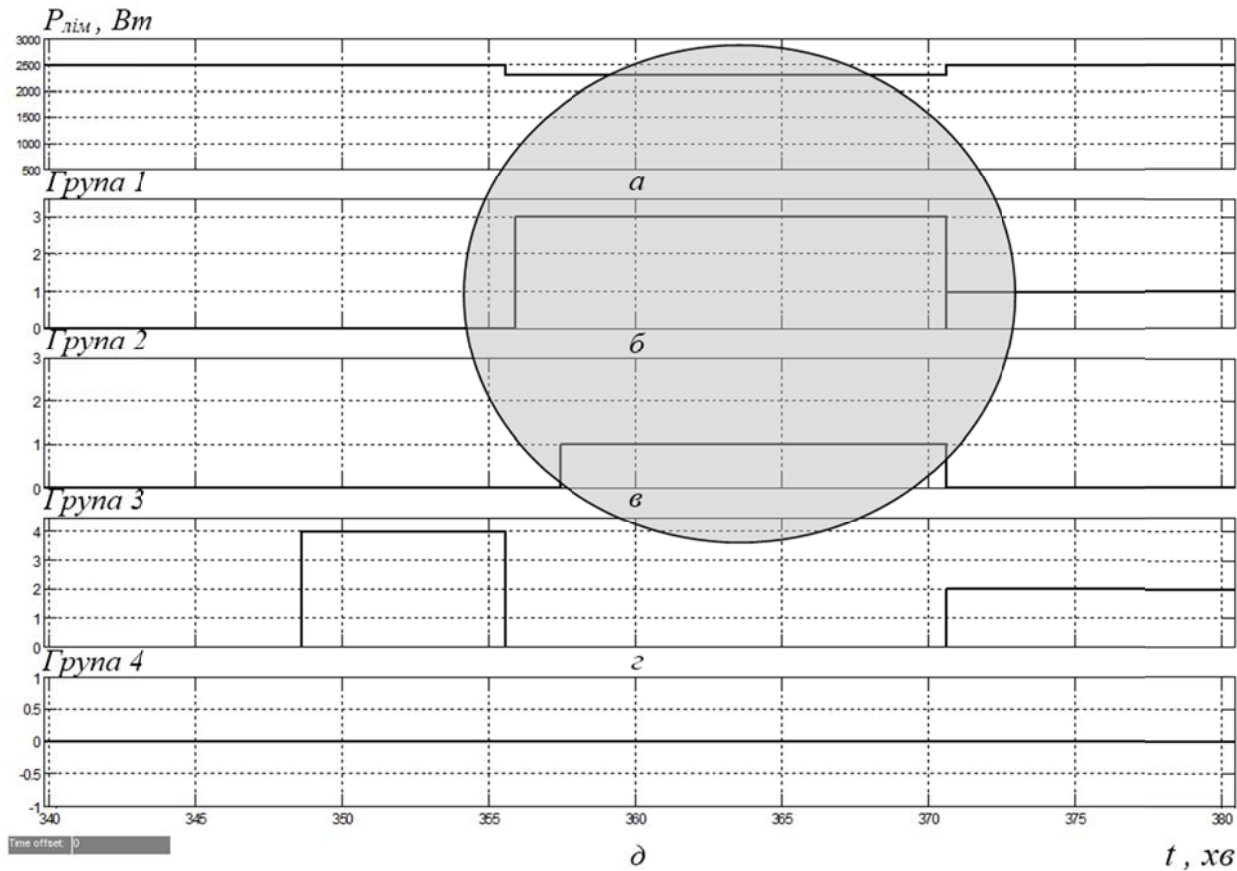


Рисунок 4.24 – Зміна у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири (а) та змінних, які відображують номер обігрівача, що увійшов у першу (б), другу (в), третю (г) або четверту (д) групи

Причиною входження обігрівачів потужністю 1 кВт до першої та другої груп є те, що на часовому інтервалі від 356 до 371 хв. спостерігається ліміт за потужністю 2470 Вт із-за вмикання побутового приладу (рис. 4.24, а). Для цього значення ліміту потужності оптимальною комбінацією обігрівачів за умови максимального використання виділеного ресурсу є два обігрівачі по 1 кВт.

Отже, відповідно запропонованого алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи у часі, робота першого та третього обігрівачів потужністю 1 кВт на даному часовому інтервалі повинна бути синхронізована у часі за правилом об'єднання споживання ресурсу. Тобто, вони повинні вмикатися одночасно. Рис. 4.25 підтверджує це твердження.

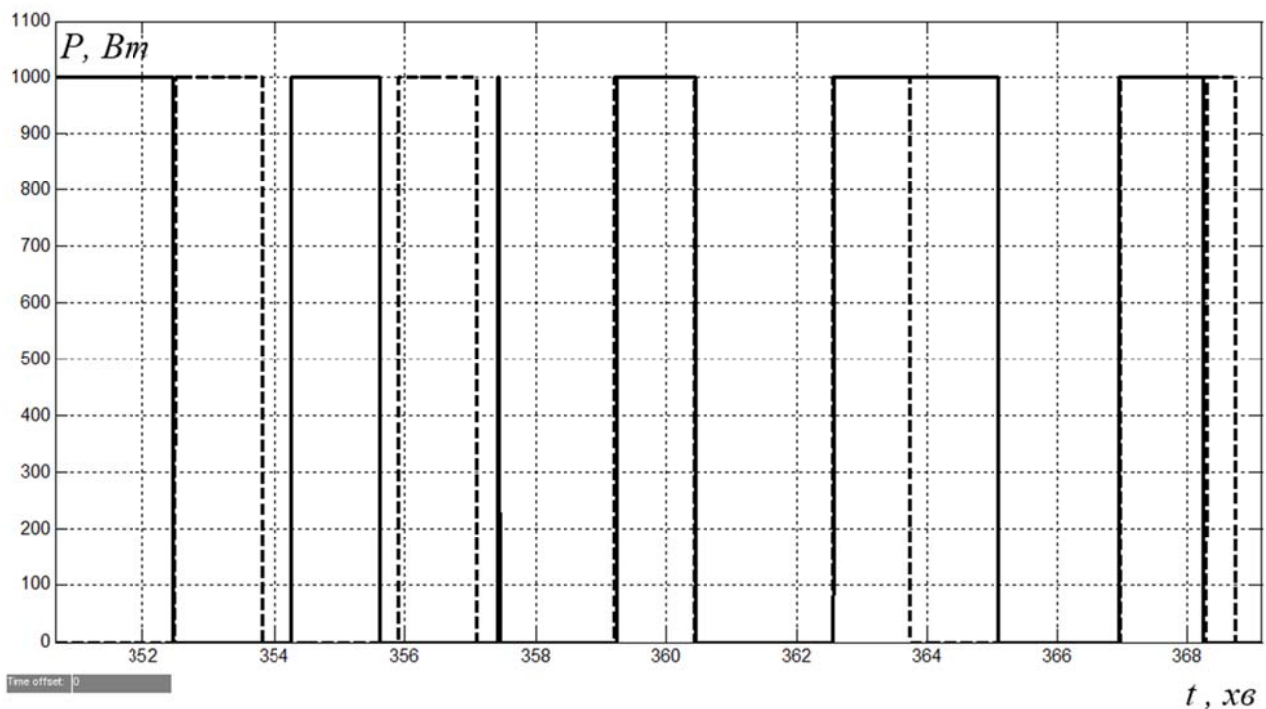


Рисунок 4.25 – Зміна у часі потужності, що споживає перший (суцільна лінія) та третій (пунктирна лінія) обігрівачі

З рис. 4.25 видно, що синхронізація роботи першого та третього обігрівачів завершується на 359 хв., тобто процес синхронізації роботи обігрівачів у часі тривав 3 хв. Починаючи з 359 хв. перший та третій обігрівачі вмикаються одночасно, це забезпечує максимальну тривалість інтервалу, коли вони вимкнені, та на якому ресурс 2470 Вт може споживати один з обігрівачів потужністю 1500 Вт.

Таким чином, експеримент показав, що робота системи керування обігрівачами, коли відбувається синхронізація у часі роботи обігрівачів однакової потужності, відбувається згідно запропонованого алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації у часі їх роботи.

3. Робота системи керування обігрівачами, коли відбувається синхронізація у часі роботи обігрівачів різної потужності.

Робота системи керування обігрівачами, коли відбувається синхронізація у часі роботи обігрівачів різної потужності, мала місце між 142 та 218 хв.

експерименту, коли ліміт потужності на обігрів знаходився на рівні 2500 Вт (область на рис. 4.26, що виділена заливкою).

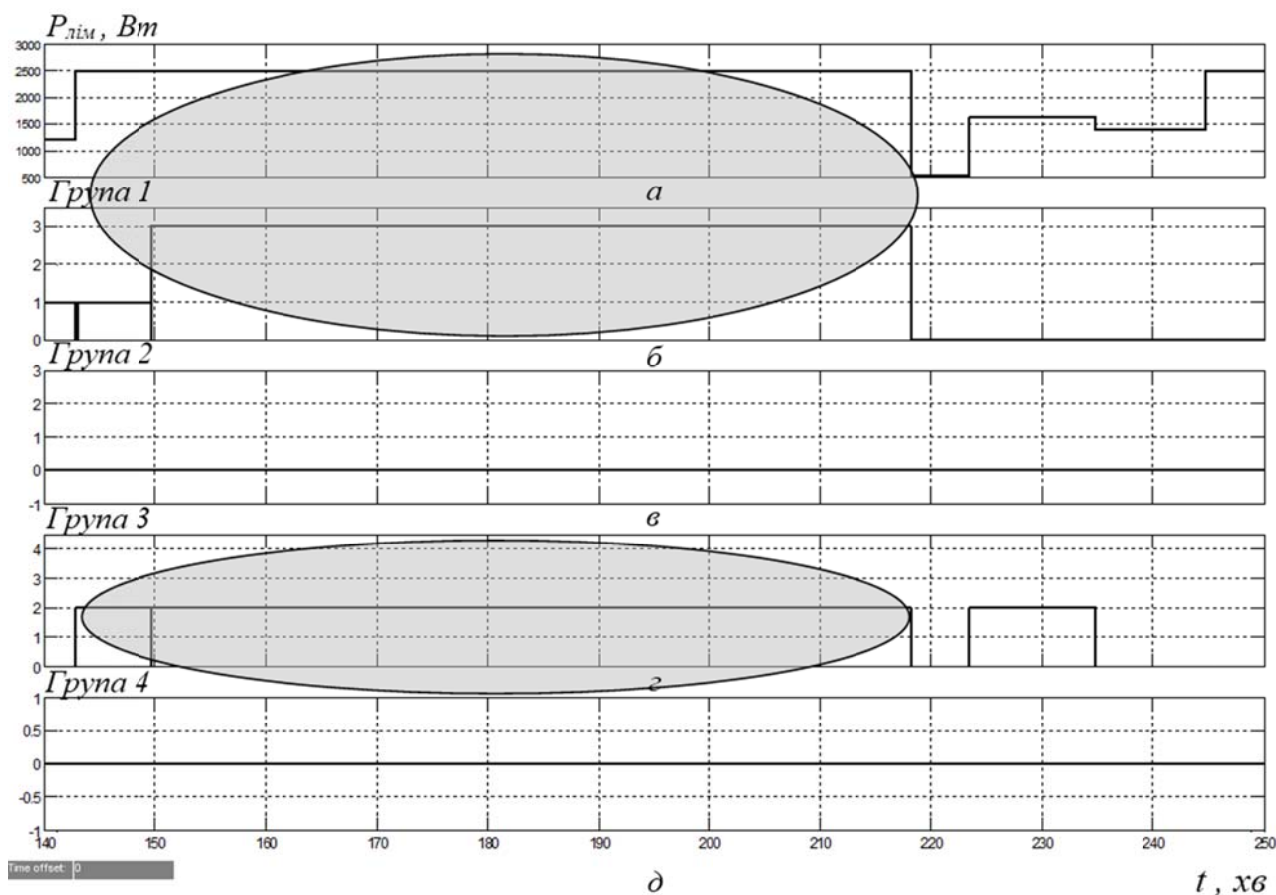


Рисунок 4.26 – Зміна у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири (а) та змінних, які відображують номер обігрівача, що увійшов у першу (б), другу (в), третю (г) або четверту (д) групи

Для даного ліміту потужності оптимальною комбінацією обігрівачів з точки зору максимального використання виділеного енергоресурсу є один обігрівач потужністю 1000 Вт та один обігрівач потужністю 1500 Вт. Тож з рис. 4.26, б та рис. 4.26, г видно, що на даному часовому інтервалі спочатку другий обігрівач потужністю 1500 Вт увійшов до третьої групи, а потім третій обігрівач потужністю 1000 Вт увійшов до першої групи.

Згідно запропонованому алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи у часі, робота другого та третього обігрівачів потужністю, відповідно, 1,5 кВт та 1 кВт на даному часовому інтервалі повинна бути синхронізована у часі за правилом розподілення

споживання ресурсу. Тобто, вимикання третього обігрівача повинне призводити до вмикання другого обігрівача, оскільки третій обігрівач із більшим періодом роботи на цьому інтервалі був головним. Таким чином, у часі постійно спостерігався вільний ресурс потужності на рівні 1 кВт, коли третій обігрівач не працював, та на рівні 1,5 кВт, коли другий обігрівач не працював. Рис. 4.27 підтверджує це твердження.

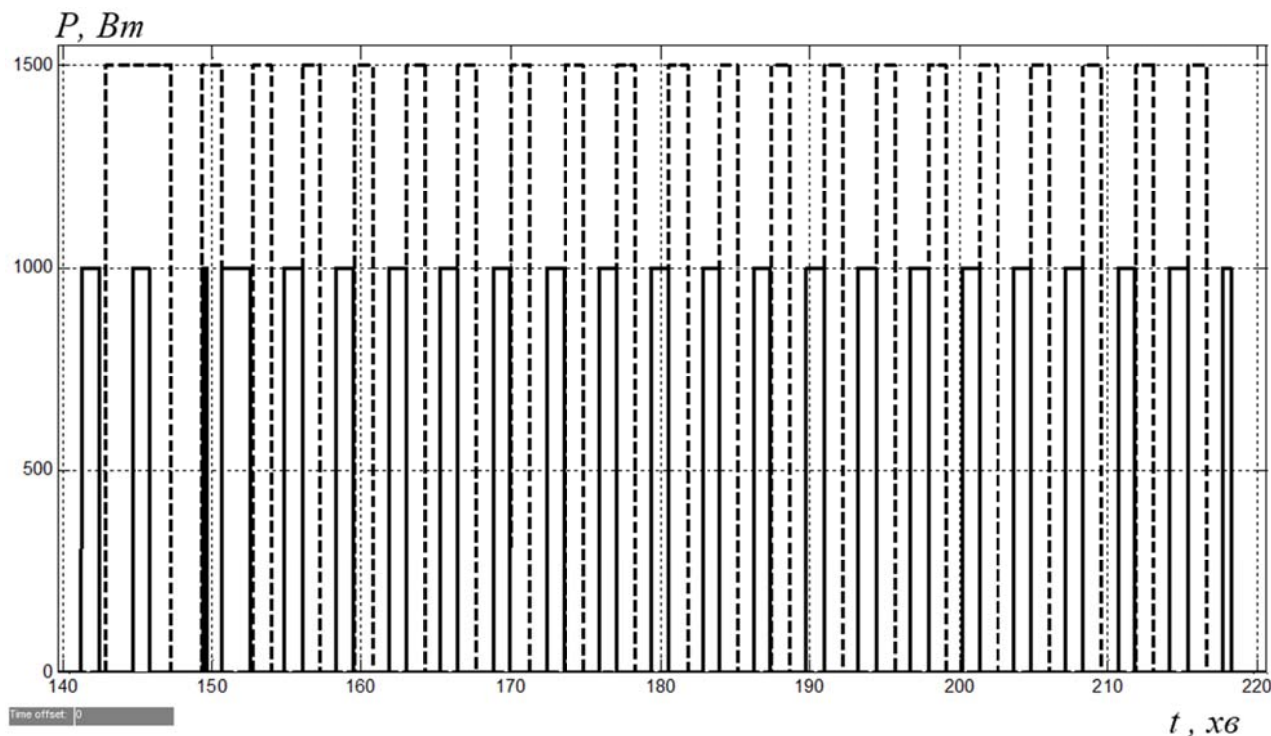


Рисунок 4.27 – Зміна у часі потужності, що споживає другий (пунктирна лінія) та третій (суцільна лінія) обігрівачі

Таким чином, експеримент показав, що робота системи керування обігрівачами, коли відбувається синхронізація у часі роботи обігрівачів різної потужності, відбувається згідно запропонованого алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації у часі їх роботи.

Окремо було досліджено зміну у часі потужності, що споживають обігрівачі, які не увійшли до груп, тобто які знаходяться у «черзі». На рис. 4.28 представлена вибірка цієї потужності між 270 та 300 хв. експерименту.

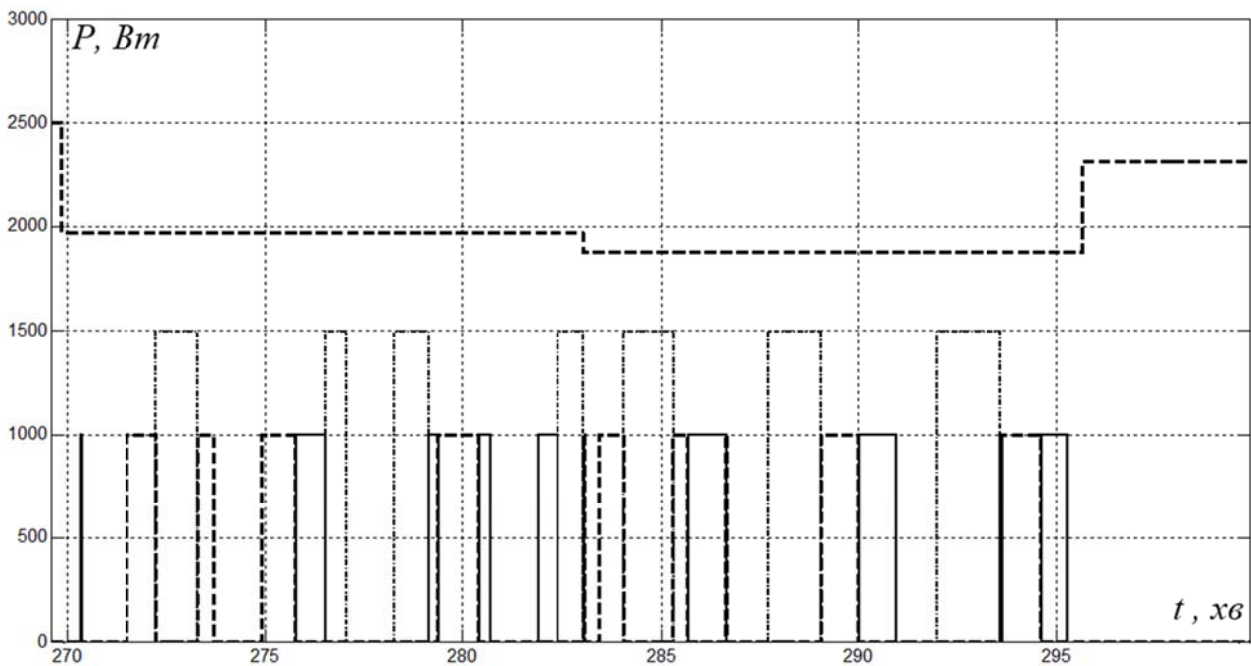


Рисунок 4.28 – Зміна у часі потужності, що споживає перший (суцільна лінія), третій (пунктирна лінія) та четвертий (штрих-пунктирна лінія) обігрівачі

З рис. 4.28 видно, що коли з'являється вільний ресурс, частіше вмикається четвертий обігрівач потужністю 1500 Вт до тих пір, доки є вільний ресурс, або він сам не вимкнеться. Це відбувається через те, що саме вмикання цього обігрівача забезпечує максимальне використання виділеного ресурсу потужності.

Також з рис. 4.28 видно, що обігрівачі потужністю по 1 кВт ділять вільний ресурс по черзі, споживаючи його протягом 1 хв кожний.

Описані закономірності роботи обігрівачів у черзі цілком відповідають запропонованому алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації у часі їх роботи.

Аналіз рис. 4.29 дозволяє зробити висновок щодо відсутності перевищення ліміту потужності 2,5 кВт, що виділений на електричний обігрів квартири. Як і за умови експерименту на імітаційній моделі системи, спостерігаються короткочасні перевищення ліміту потужності на обігрів, причина яких пояснена у підрозділі 4.4.

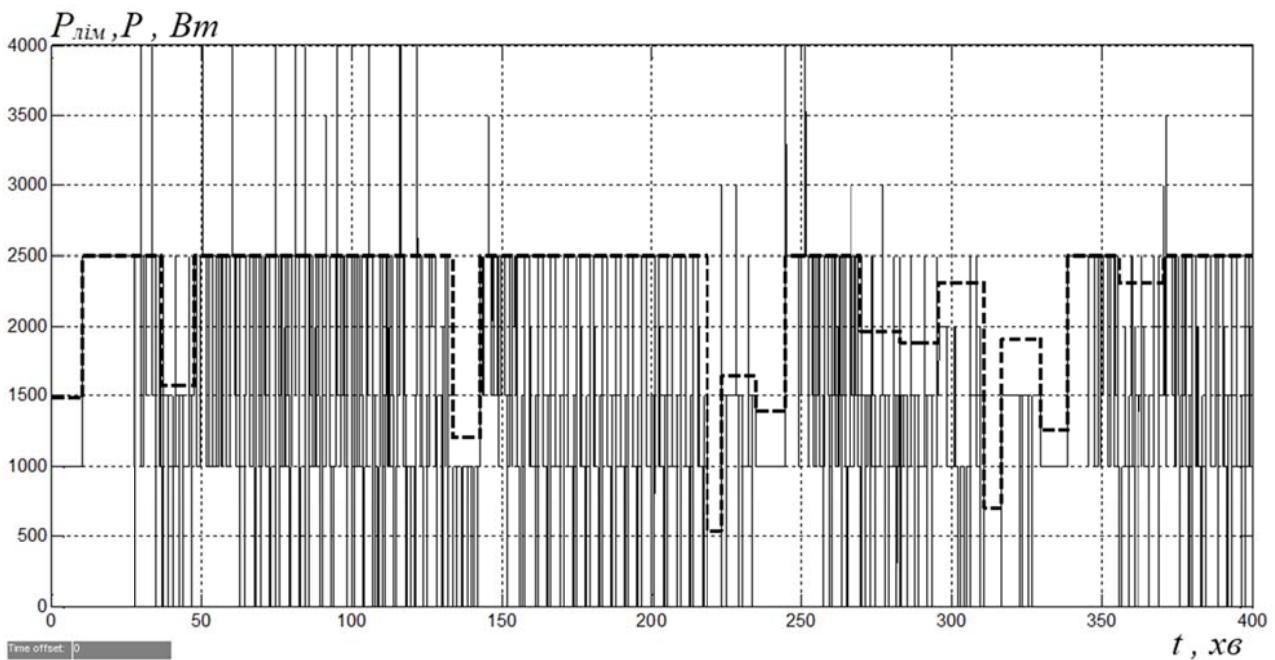


Рисунок 4.29 – Зміна у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири (пунктирна лінія) та сумарної потужності, що споживають обігрівачі (суцільна лінія)

Рис. 4.29 дає нам можливість за результатами експерименту проаналізувати роботу груп обігрівачів – ми можемо простежити, які обігрівачі, в залежності від різних ситуацій при обігріві квартири, потрапляли до кожної групи.

З рис. 4.29 видно, що за умови зменшеного ліміту потужності на обігрів квартири до 2,5 кВт, згідно рекомендаціям за результатами обчислювального експерименту на моделі системи, маємо зовсім інший характер роботи груп обігрівачів.

Найчастіше обігрівачі потрапляли до першої та третьої груп, що розподіляють ресурс, відповідно, 1 та 1,5 кВт. Це зумовлено максимальним використанням встановленого ліміту потужності 2,5 кВт. До другої групи обігрівачі потрапляли рідко і тільки тоді, коли спостерігалася тривале знаходження ліміту потужності між значеннями 2 та 2,5 кВт. До четвертої групи обігрівачі не потрапляли зовсім, тому що у цьому разі споживана обігрівачами потужність буде дорівнювати 3 кВт, що перевищує встановлений ліміт.

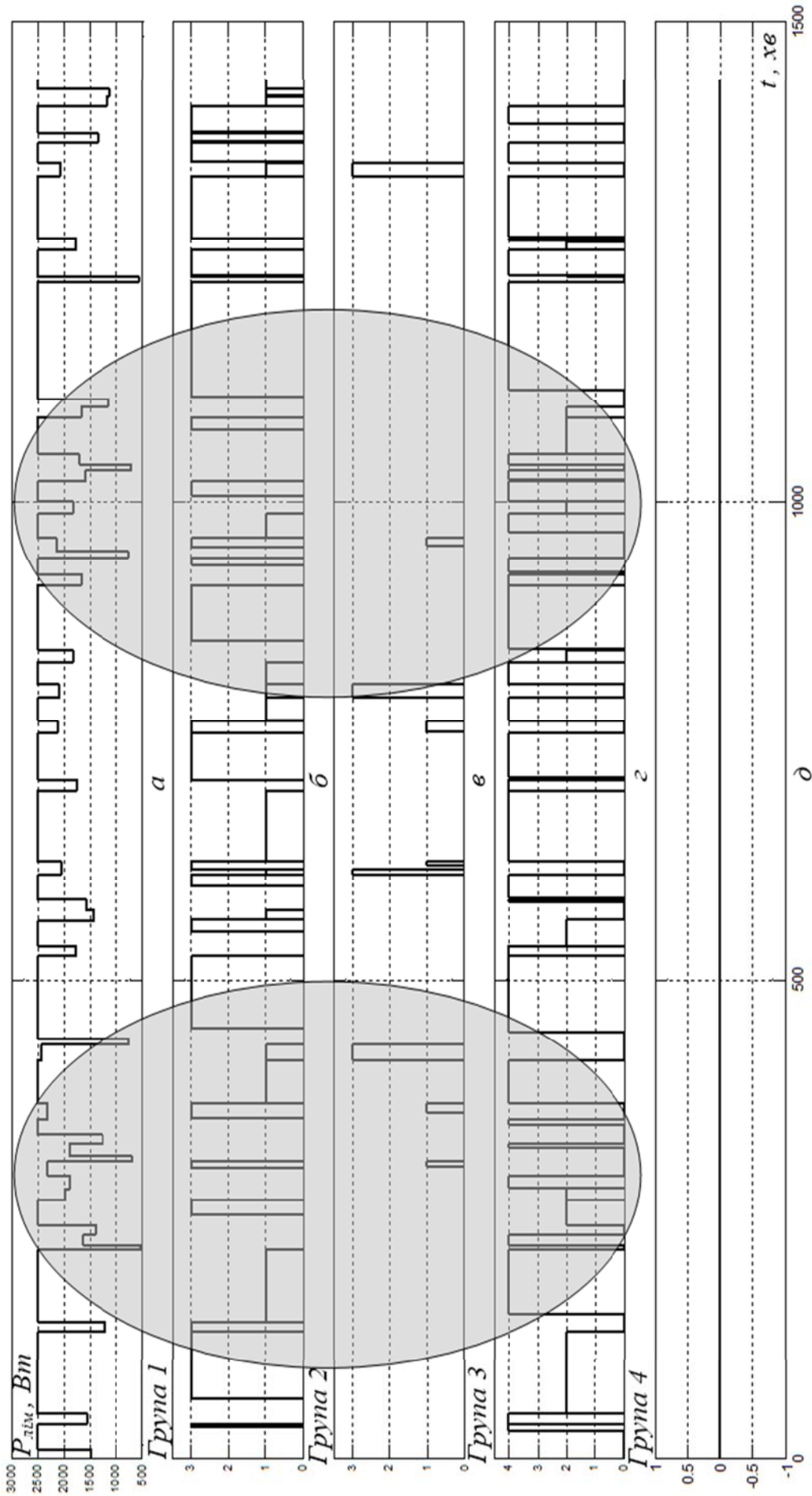


Рисунок 4.30 – Зміна у часі ліміту потужності на електричний обігрів квартири (а) та змінних, які відображують номер обігрівача, що увійшов у першу (б), другу (в), третю (г) або четверту (д) групи

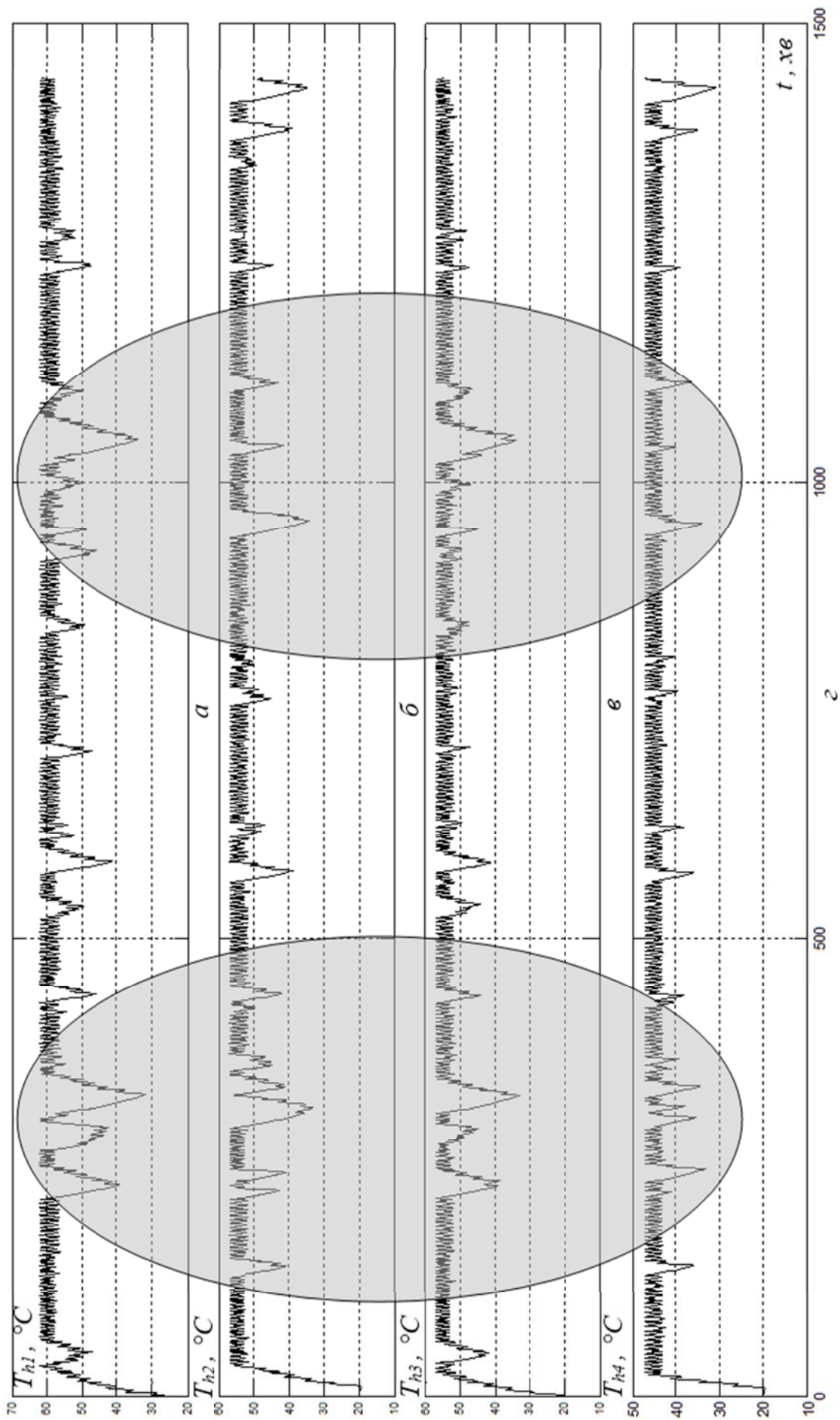


Рисунок 4.31—Зміна у часі температури поверхні першого (а), другого (б), третього (в) та четвертого (г) обігрівачів

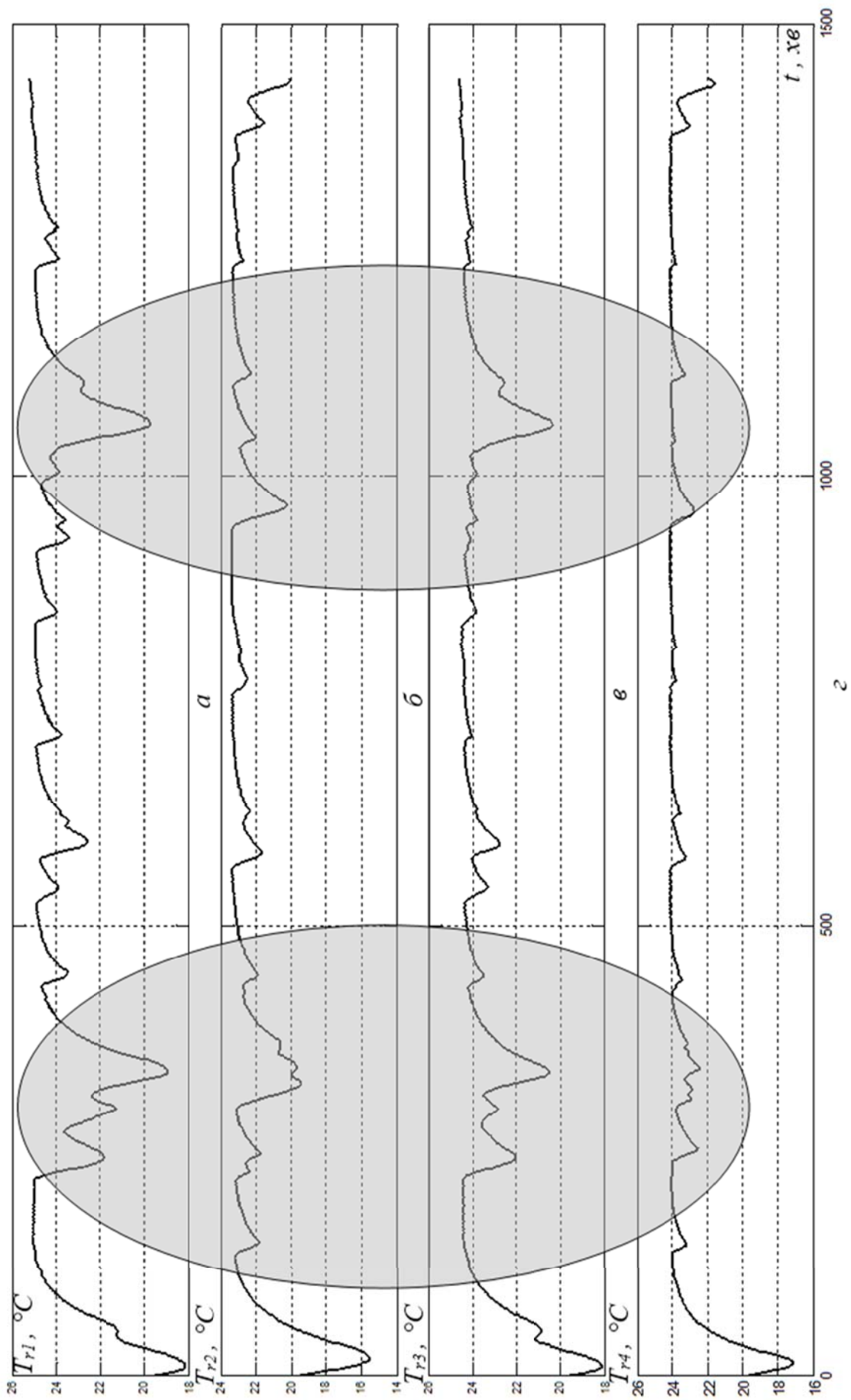


Рисунок 4.32 – Зміна у часі температур у першій (а), другій (б), третій (в) та четвертій (г) зонах обігріву

Заливкою на рис. 4.30–4.32 виділені області графіків, коли спостерігалися часті підключення до електричної мережі інших побутових пристроїв. Область, що зліва відповідає ранку між 7 та 11 годинами. Область, що справа – вечору між 17 та 22 годинами.

З рис. 4.30 ми бачимо, що протягом ранкового та вечірнього часів на областях графіку з заливкою спостерігаються тривалі, протягом 60-90 хв., та значні, до 20–30°C, відхилення фактичних температур поверхонь обігрівачів від заданих рівнів. На інших інтервалах доби відхилення не перевищують за рівнем 15°C та за часом 30 хв та схожі на ті, що спостерігалися за умови обчислювального експерименту на основі моделі системи у підрозділі 4.4.

Тривалі та значні відхилення фактичних температур поверхонь обігрівачів від заданих рівнів у ранковий та вечірній часи призвели до значних відхилень фактичних температур у деяких зонах обігріву від заданих значень на 4–5°C (області з заливкою на рис. 4.32).

Тож, на основі аналізу результатів експериментів, проведених за допомогою експериментального зразку системи керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації за умови різних ситуацій при обігріві кімнат квартири, можна зробити наступні висновки:

- за умови різних ситуацій при обігріві кімнат квартири робота експериментального зразку системи керування обігрівачами відповідає основним положенням запропонованого алгоритму керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації у часі їх роботи. Перевірка експериментального зразку системи керування обігрівачами була виконана для таких режимів роботи системи, як перший запуск, синхронізація у часі роботи обігрівачів однакової та різної потужності та присутність у черзі трьох обігрівачів, два з яких – однакової потужності;

- перевірка експериментального зразку системи керування обігрівачами у реальних умовах показала, що в залежності від часу доби та, відповідно, кількості побутових приборів, що підключається до електричної мережі, для забезпечення заданої температури у зонах обігріву потрібний різний ліміт за потужністю – більший у ранковий та вечірній час доби, та менший уночі та в обід. Тож, доцільним буде створити та додати у систему алгоритм підтримки прийняття рішень користувачем щодо визначення ліміту потужності на електричний обігрів та його коригування в залежності від часу доби.

Глава 5. Системотехніка розумних теплових полів

Оригинальная конструкция, заря автомобилизма. Видите, Балаганов, что можно сделать из простой швейной машинки Зингера?

Илья Ильф, Евгений Петров, «Золотой телёнок»

5.1 Аналіз технічних рішень, які можуть бути використані для побудови інтелектуальних мереж прямого електричного опалення

Нижче наведено декілька найбільш сприятливих для вирішення означеної задачі технічних рішень.

Інтелектуальна розетка Senseit GS2 (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд розетки Senseit GS2

Цей пристрій [31] дозволяє дистанційно керувати побутовою та офісною технікою, системами освітлення та кондиціонування. Комплект Senseit GS2 складається з двох розеток: Senseit GS2 M (Master-розетка) і Senseit GS2 S (Slave-розетка).

Senseit GS2 M підтримує роботу в стандартах GSM/GPRS і має слот для установки SIM-карти. GS2 M є основним пристроєм, який управляє розетками Senseit GS2 S. До одного пристрою Senseit GS2 M можна підключити до 10 Senseit GS2 S. Таким чином, використовуючи всього одну SIM-карту, користувач може отримати систему «розумного» будинку з 11 розеток.

Управляти розетками досить просто: за допомогою Android або iOS додатки, через веб-інтерфейс або навіть за допомогою SMS. Пристрій не вимагає монтажу та простий в підключенні. В розетку Senseit GS2 M необхідно

вставити SIM-карту, потім підключити її до звичайної домашньої розетки. Senseit GS2 S не вимагає установки SIM-карти, вона зв'язується з Master-розеткою по радіоканалу.

До розеток Senseit GS2 можна підключати будь-які побутові прилади, включаючи лампи, кондиціонери, обігрівачі, комп'ютери, системи моніторингу та безпеки і багато іншого. Кожна розетка здатна витримувати навантаження до 3500 Вт (16 А). За допомогою розеток Senseit GS2 можна налаштувати режим роботи побутової техніки за таймером або за розкладом, а власник зможе стежити за функціонуванням приладів віддалено за допомогою смартфона.

Недоліком подібної системи є неможливість автоматично підтримувати режим обмеження електричної потужності керованого за допомогою системи Senseit G обладнання внаслідок відсутності функцій контролю рівня споживання електричної енергії

Реле пріоритету навантажень (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 – Багатоканальне реле пріоритету навантажень

Реле пріоритету навантажень (або реле управління навантаженням), [32] призначено для використання в якості засобу автоматичного відключення непріоритетних навантажень в разі, якщо починається перевищення максимально допустимого загального струму. Тобто цей пристрій лімітує споживану від мережі електричну потужність за допомогою від'єднання від мережі непріоритетних навантажень, коли це необхідно, і залишаючи підключеними лише пріоритетні. Такі реле лежать в основі систем автоматичного управління навантаженнями.

На загальній лінії живлення встановлюється трансформатор струму, а вже після нього підключаються навантаження, причому спочатку включаються пріоритетні навантаження, що не відключаються ні за яких умов. Далі підключається реле пріоритету навантажень, через яке і підключаються групи споживачів, які будуть відключатися в заданій послідовності.

Сигнал з датчика струму обробляється за допомогою вбудованого в модуль компаратора, відбувається порівняння сигналу, з опорною напругою (задається налаштуваннями перемикача), і уставка реле визначає, при якому струмі спрацює компаратор, і в який момент внутрішній контактор відключить групу навантажень, яка має найнижчий пріоритет. Через деякий час, відбудеться спроба знову підключити до мережі непраіоритетне навантаження, починаючи від найбільш пріоритетною з відключених.

Якщо застосувати реле пріоритету, контактори в якому розраховані на струм до 16А, можна зробити пріоритетними світло, і деякі розетки, а пару непраіоритетних груп включити через модуль реле, тоді при перевантаженні відключиться самий малозначний прилад, на розсуд користувача.

Недоліком подібного підходу є «жорстка» структура мережі розподілу потужності, яка вимагає спеціальної прокладки мережевих дротів в контрольованому приміщенні. При управлінні електроопаленням недостатня гнучкість системи вимагає від користувача самостійно вибрати пріоритети, які будуть спрацьовувати на постійній основі незалежно від розподілу температур у контрольованих приміщеннях.

Побутовий оптимізатор навантаження на електромережу OEL-820.

Принци дії системи [33] розглянемо на прикладі двох кімнат. Для управління електричними опалювальними приладами буде потрібно два побутових оптимізатора навантаження на електромережу OEL-820.

Пріоритетний опалювальний прилад (електроконвектор) в першій кімнаті підключається в розетку через блок А оптимізатора навантаження, а непраіоритетний, в другій кімнаті, підключається через блок В.

При включенні пріоритетного електроконвектора А в режим нагріву, непріоритетний електроконвектор В, відключається. Як тільки температура в першій кімнаті досягне заданого значення, електроконвектор А відключить нагрів. Розпочнеться робочий цикл непріоритетного електроприладу В.

Коли температура в другій кімнаті досягне встановленого значення, електроконвектор В відключиться. Деякий час, залежне від якості теплоізоляції приміщень, можуть бути вимкнені обидва електроконвектора. В цей час температура в першій кімнаті повільно знижується.

При падінні температури нижче заставленого значення, пріоритетний електроконвектор А вмикається і починає свій новий робочий цикл.

Оскільки в парі електроконвекторів включеним може бути один і тільки один електроконвектор, їх загальна споживана від мережі потужність не перевищить ліміт. Решта електроприладів також розподіляються по заданих блокам А і В. Таким чином робота ґрунтується на змінному включенні блоків.

Недолік: якщо хоч один прилад включений до блоку, поки він не завершить роботу другий блок не включиться і, відповідно, підключення більшої кількості кімнат знижує комфортність використання техніки. Крім того в цій системі відсутній контроль загальної потужності, а це означає, що автоматичне обмеження поточної випадково змінної потужності на заданому рівні неможливе.

Система на базі модулю захисту та автоматики «WoltER Protect».

Основна функція мережевого модуля «VolterProtekt», розподіляти наявну виділену на квартиру потужність між електроприладами постійного включення і приладами тимчасового включення за пріоритетом [34]. Оскільки прилади першої групи мають істотну інерцію роботи, то саме від них перерозподіляється потужність при перевищенні ліміту, без шкоди ефективності роботи.



Рисунок 5.3 – Зовнішній вигляд модуля WoltER Protect

Всі побутові електричні прилади діляться на дві групи (рис. 5.4) за способом роботи:

– прилади постійного включення. Це прилади цілодобового дії, робота яких обумовлена системними циклами, або закладеної в автоматизу управління програмою. До таких приладів відноситься – електричне опалення, електричний бойлер, кондиціонер;

– прилади тимчасового включення. До розряду цих приладів відносяться практично вся побутова техніка – електропечі, теле/відео техніка, пральна і посудомийна машини, чайник, праска і т.п.

Система здійснює автоматичний перерозподіл потужності між котлом (бойлером) і групою приладів з пріоритетом №1 з урахуванням заданого ліміту потужності і рівня споживання енергії групою приладів поза пріоритету.

На рис. 5.5 показана однолінійна схема мережі електропостачання з модулем захисту і автоматики.

Найголовніше що користувач отримує при такій модифікації використання виділеного ліміту потужності, це можливість включити електроприлади, наприклад, чайник або електроплиту, при працюючому електричному опаленні без ризику, що це призведе до відключення всієї мережі електропостачання. Автоматика сама перерозподілить доступну потужність між працюючими електроприладами в автоматичному режимі.

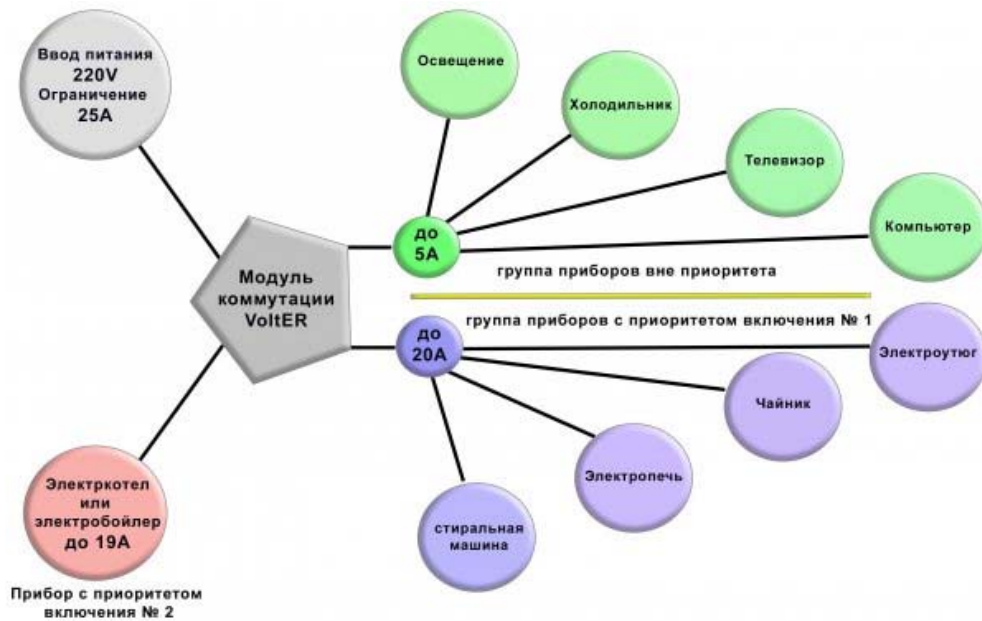


Рисунок 5.4 – Принцип організації мережі електропостачання з модулем «Volter Protakt»



Рисунок 5.5 – Однолінійна схема мережі електропостачання з модулем захисту і автоматики

Основним недоліком такого технічного рішення є централізований спосіб управління розподільною мережею електропостачання об'єкта. Використання прототипу в квартирах (офісах, гуртожитках, ...) з прокладеної раніше мережею електропостачання, що не враховує розподіл споживачів між лініями різного пріоритету, вкрай важко. Будуть потрібні додаткові електромонтажні роботи зі

зміни розводки мережі електропостачання. Крім того, наявність всього трьох ліній пріоритету мало для управління режимом енергоспоживання системи з великою кількістю індивідуальних електронагрівальних приладів, встановлених в різних приміщеннях.

Запатентовані інженерні рішення

У патенті США No. 5,424,903 запропоновано «інтелектуальний силовий комутатор», який являє собою інтелектуальну силову систему для контролю та комутації електричного підключення джерела живлення до кожного з безлічі виходів, таких як компоненти персонального комп'ютера або електронного розважального обладнання. Схема перемикача підключена до релейних схем для вироблення сигналів у відповідь на команди користувача, щоб вибирати включений або вимкнений стан кожного з виходів.

У патенті США No. 6,618,772 запропоновано «спосіб і пристрій для вибору, контролю та управління пристроями з електроживленням». Відповідно до одного з варіантів пристрій являє собою пристрій з електроживленням, має ключову навантажувальну лінію і комутуючі схеми управління для контролю використання пристрою з електроживленням за рахунок розриву ключової навантажувальної лінії.

У патенті США No. 6,741,442, заявлена «інтелектуальна система розподілу потужності», що містить схеми керування живленням, які можуть підключати та відключати силові виходи відповідно до заданої оператором послідовності із заданими затримками. Схеми керування живленням додатково можуть визначати струм і управляти режимом електроживлення на підставі виміряного електричного струму.

У патенті RU 2 249 2 87 C2 , Н 02 J 13/00, G-05 D 23/19 заявлено «Спосіб управління групою електронагрівальних пристроїв», за яким здійснюється підключення до електромережі електронагрівальних пристроїв за допомогою локального блоку управління, який забезпечує можливість двохпозиційного управління роботою електронагрівальних пристроїв з використанням температурно-часових циклограм, для реалізації яких у кожний

контрольований момент часу здійснюється опитування усіх термовимірювальних приладів та вимірювання електричної потужності контрольованої електромережі (рис. 5.6).

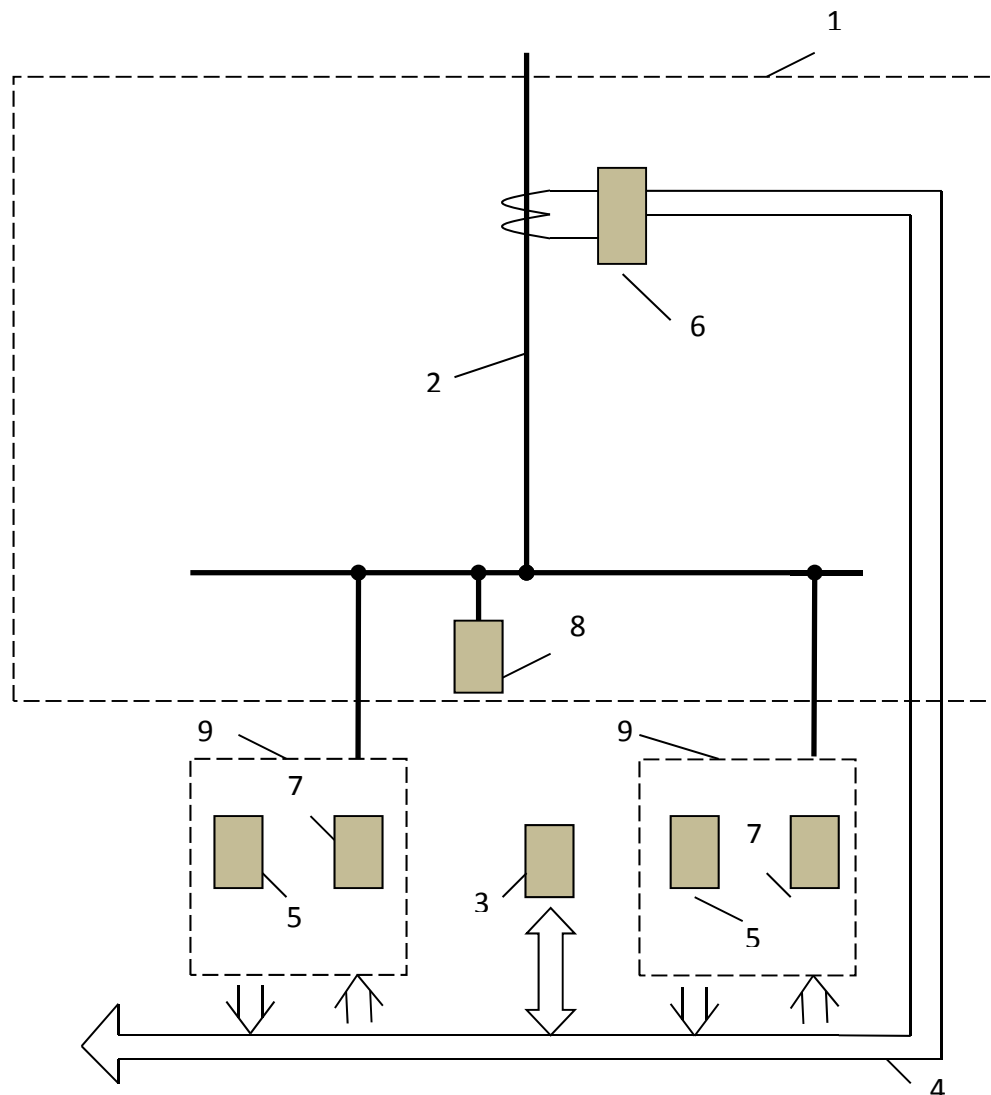


Рисунок 5.6 – Система управління групою електронагрівальних приладів.
Схема структурна

Спосіб здійснює двохпозиційне температурно-часове управління наступним чином: на контрольованому інтервалі часу блок управління опитує всі термовимірювальні пристрої. Якщо результат порівняння вимірювання із заданими значеннями негативний то на послідуєчому інтервалі часу відключають всі нагрівальні пристрої. При позитивному результаті порівняння починають включати по чергово нагрівальні пристрої по мірі зменшення

відхилень температури від заданих значень. Цей процес супроводжується вимірюванням електричної потужності контрольованої мережі. Якщо на деякому інтервалі часу потужність перевищує допустиме значення, то на послідуєчому інтервалі здійснюється відключення нагрівальних пристроїв у такій послідовності, що першими відключаються електронагрівачі в тих зонах, температура яких найбільше перевищує, або найменше відрізняється від заданого значення.

На рис. 5.6:

- 1- Контрольоване приміщення.
- 2- Мережа електропостачання.
- 3- Локальний блок управління.
- 4- Лінія зв'язку.
- 5- Термовимірювальні прилади.
- 6- Сенсор вимірювання потужності.
- 7- Електричні нагрівальні прилади.
- 8- Нерегульовані користувачі електроенергії.
- 9- Зони теплопостачання (кімнати).

Недоліком даного рішення являється централізоване управління групою електронагрівальних пристроїв які включаються та виключаються при досягненні заданих температур контрольованих середовищ. Це не дозволяє у повній мірі вирішити проблему автоматичного розподілу електричної енергії між електричними нагрівачами, які забезпечують заданий розподіл температур в контрольованих зонах обігріву при максимально повному використанні електричної потужності, рівень обмеження якої випадковим чином змінюється у часі.

По-перше, при двохпозиційному централізованому регулюванні температури декількох контрольованих середовищ (два та більше) з використанням у зворотному зв'язку в якості команд на переключення нагрівачів температур самих середовищ при обмеженні допустимої електричної потужності на рівні, меншому ніж сумарна встановлена потужність нагрівачів,

можливі або великі коливання температур середовищ, або регулярні перевищення допустимої електричної потужності на контрольованому інтервалі часу.

По-друге, рішення, яке розглядається, не дозволяє використовувати у якості нагрівачів серійні електричні пристрої, які обладнані вбудованими терморегуляторами релейного типу, а потребують окремих термовимірювальних пристроїв, адаптованих для передачі даних на блок управління групою нагрівачів.

По-третє, недоліком централізованого керування є неможливість підтримання температур контрольованих середовищ у автономному режимі при виходу з ладу блоку управління, загального для всієї групи нагрівачів.

Таким чином, підводячи підсумок огляду відомих технічних рішень, можна бачити, що вони або не забезпечують комфортний розподіл теплової енергії за умов обмеження електричної потужності, яка лімітується на випадковому рівні внаслідок включень та відключень нерегульованого електричного обладнання, або мають жорстку централізовану структуру, яка потребує спеціальної розводки мереж електричного живлення, або, знов таки, внаслідок централізованої структури за відомими рішеннями не досягається потрібний рівень надійності та живучості системи управління розподілом електричної енергії при прямому електричному опаленні приміщень.

Позитивний конструктивний висновок, який можна зробити з аналізу відомих технічних рішень полягає в ідеї використання інерційності опалювального процесу для оперативного короткочасного перерозподілу електричної енергії між електричними приладами та опалювальним обладнанням.

5.2 Принципи технічної реалізації ідеї розумного теплового поля

Відомі технічні рішення не дозволяють вирішити проблему побудови розумного теплового поля, в якому автоматично здійснюється розподіл

електричної енергії, рівень обмеження якої випадковим чином змінюється в часі, між електричними нагрівачами, що забезпечують заданий розподіл температур в контрольованих зонах обігріву. Цей недолік відомих рішень пов'язаний з тим, що задана наперед послідовність і затримки перемикання силових виходів, до яких приєднані нагрівальні пристрої, при випадковому характері змін рівня обмеження використовуваної електричної потужності призводять або до недовикористання лімітованої потужності, або до перевищення її ліміту, що за умовами експлуатації контрольованого об'єкта неприпустимо.

Концептуальну структурну схему розумного теплого поля [35] наведено на рис. 5.7. Вимірювання електричних параметрів мережі живлення опалювального об'єкта в цілому здійснює мережевий контролер 4.



Рисунок 5.7 – Концептуальна структурна схема розумного теплого поля

Опалювальні пристрої підключаються до мережі живлення через смарткони 1, які конструктивно являють собою подовжувачів електричних розеток. Інші електричні прилади підключаються до мережі живлення

безпосередньо. Середовищем для інформаційної мережі розумного теплового поля може бути безпосередньо сама мережа живлення опалювального об'єкту (PLC – канал).

Функціональна схема інтелектуальної мережі прямого електричного опалення показана на рис. 5.8. Пропонований принцип її побудови вільний від недоліків розглянутих вище відомих рішень. Згідно цьому принципу рішення про переключення кожного з силових виходів 3, до яких приєднані електронагрівачі 2, приймається відповідним інтелектуальним пристроєм – смартконом 1 на підставі інформації, отриманої від усіх інших смартконів, об'єднаних з даним в інтелектуальну мережу, а також з використанням інформації про рівень обмеження потужності контрольованого об'єкта і про поточний стан його енергоспоживання, що залежить як від сумарної потужності, включених в даний момент часу електронагрівачів, так і від випадкової величини сумарної потужності, включених в даний момент часу електроприладів. Це досягається тим, що смарткони 1, керуючі окремими електронагрівачами, обмінюючись інформацією, наприклад, по силовій мережі електропостачання 7, повідомляють центральному контролеру 4, який веде облік споживаної електроенергії і зберігає допустимі граничні навантаження контрольованої мережі електропостачання, свої потреби в електричній енергії і ранг пріоритету в отриманні енергії, а центральний контролер, усереднює отримані від смартконів дані та повідомляє їм результати усереднення. На основі цих даних смарткони приймають рішення про підключення до мережі електропостачання керованих ними електронагрівачів. Відбір останніх до складу робочої групи здійснюється згідно з рангами їх пріоритетів за умови обмеження сумарної потужності, споживаної нагрівачами 2 на рівні, що не перевищує допустиме граничне навантаження.

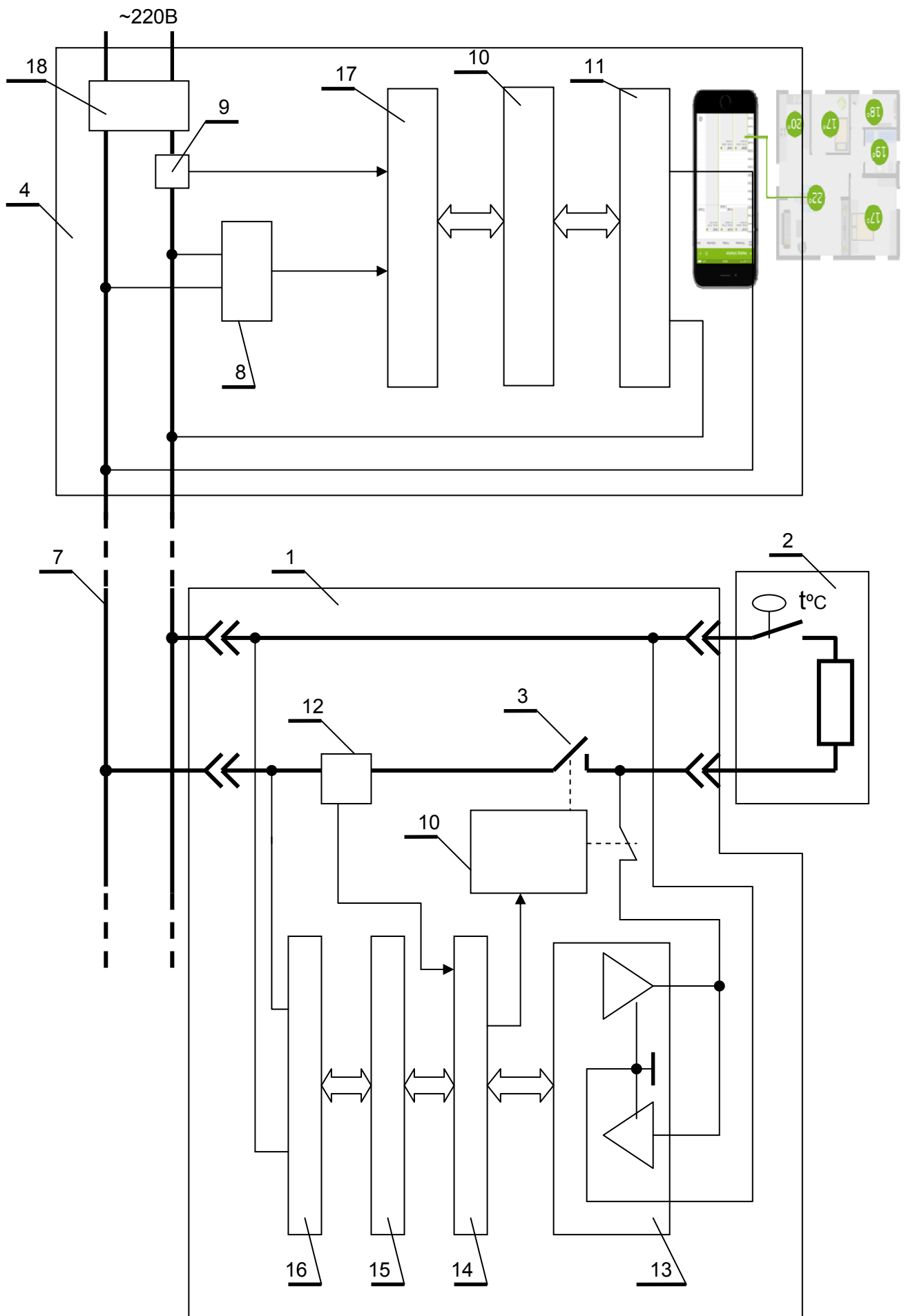


Рисунок 5.8 – Функціональна схема інтелектуальної мережі прямого електричного опалення

При цьому після прийняття рішень усіма смартконами в системі досягається рівновага по типу рівноваги Неша, при якій не використаний залишок потужності в мережі електропостачання не перевершує потужності будь-якого з не підключених електронагрівачів.

Система включає.

1) Центральний контролер 4, у складі якого є процесор 17, який містить необхідні елементи для обчислення і оперативного зберігання величини потужності, яка може бути розподілена між електронагрівачами без перевищення допустимого рівня граничного навантаження силової мережі. Процесор 17 також містить необхідні елементи для підсумовування запитів на отримання електроенергії, що надходять по каналу зв'язку через порт введення-виведення процесора. У складі центрального контролера також є блок вимірювання напруги 8 силової мережі і блок вимірювання величини струму 9, який протікає по ній. Порт введення-виведення процесора підключений до першої групи входів-виходів приймача-передавача 10, призначеного для прийому і передачі сигналів по силовій мережі. Друга група входів-виходів приймача-передавача 10 підключена до пристрою 11, який здійснює сполучення приймача-передавача 10 з фазним і нульовим проводами силової мережі.

2) Смарткони 1, які керують підключенням до мережі електропостачання та відключенням електронагрівачів. Смарткон містить процесор 14, перший аналоговий вхід якого підключено до виходу модуля 12 вимірювання сили струму в ланцюзі електрообігрівача 2. Перший порт введення-виведення дискретних сигналів процесора 14 підключено до першої групи входів і виходів приймача-передавача 15 інформації по силовій мережі, друга група входів і виходів якого підключена через пристрій сполучення 16 до фазного і нульового проводів силової мережі, а другий порт введення-виведення дискретних сигналів процесора 14 підключений до блоку розпізнавання навантаження 13, вихід якого через керований процесором комутатор 10, подає тестовий сигнал на електронагрівач, а вхід контролює рівень тестового сигналу, що знімається з

електронагрівача. Комутатор 10 за допомогою контактного або безконтактного вихідного пристрою замикає ланцюг подачі струму на електронагрівач 2 по команді, що надходить від процесора 14. При цьому канал подачі тестового сигналу відключається. Ланцюг подачі струму на електронагрівач 2 розмикається вбудованим терморегулятором електрообігрівача. При цьому комутатор 10 також розмикає ланцюг подачі струму на електронагрівач 2 і підключає канал подачі до нього тестового сигналу.

Результат розпізнавання навантаження смарткону використовується для блокування автоматичних відключень такого роду обладнання, як, наприклад, холодильник, комп'ютер, телевізор і т.п. Якщо ж навантаження розпізнається як електронагрівач, то шляхом порівняння величини амплітуди тестового сигналу з записаними в пам'яті смарткону значеннями, розпізнається номінальна потужність електронагрівача. З метою обмеження розповсюдження високочастотного сигналу, що використовується для обміну інформацією пристроїв системи, в складі центрального контролера 4 є загороджувальний фільтр 18, включений між зовнішньою мережею живлення і мережею, до якої підключено електрообладнання контрольованого об'єкта.

5.3 Інтелектуальний вимірювач електричної потужності

Оскільки смарткон є подовжувачем розетки, до нього може бути підключено будь яке обладнання. Для блокування помилкових відключень обладнання, яке не має відношення до опалювальної мережі, смарткон повинен розпізнавати характер підключеного до нього навантаження [36]. Якщо підключене до смарткону обладнання не розпізнається як нагрівальний пристрій, цей смарткон не бере участь у розподілу потужності мережі живлення. Якщо підключене до смарткону обладнання розпізнається як нагрівальний пристрій, необхідно для цього смарткона знати величину потужності підключеного нагрівача, щоб брати участь у колективному розподілу потужності мережі живлення. Схема вузла розпізнавання навантаження показана на рис. 5.9.

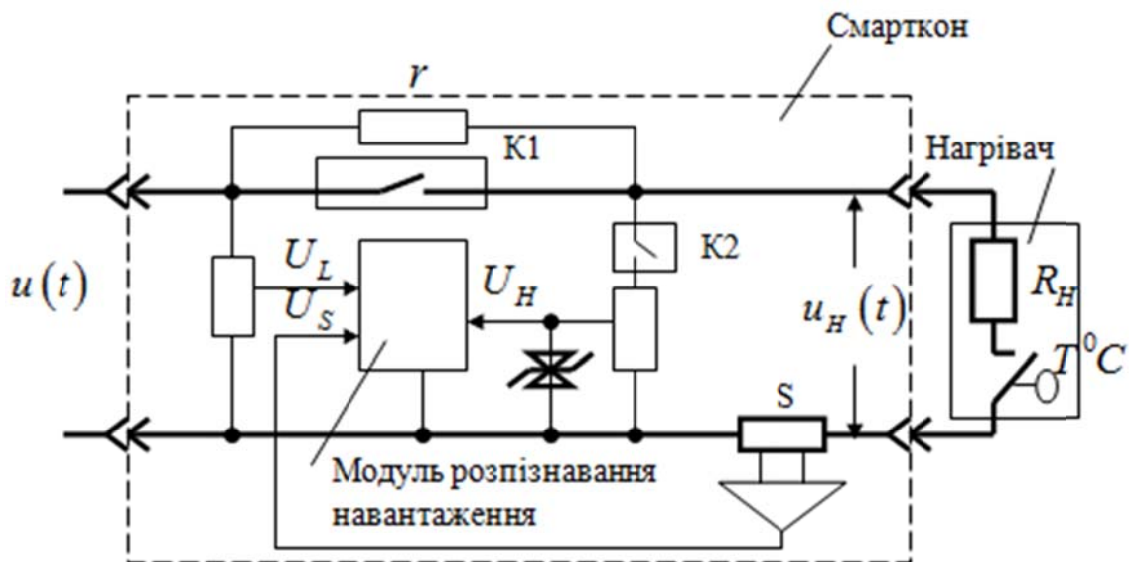


Рисунок 5.9 – Функціональна схема вузла розпізнавання навантаження

Силовий ключ $K1$ шунтується резистором r , величина якого набагато більше ніж опір нагрівача R_H найменшої можливої потужності. Це необхідно для того, щоб при відключеному нагрівачі (розімкнуто ключ $K1$) була можливість розпізнати характер та величину навантаження смарткону. При розімкненому ключі $K1$ замикається ключ $K2$, який підключає ланцюг вимірювання падіння напруги на опорі нагрівача. Сигнал, пропорційний цій вимірюваній величині, подається на вхід U_H модуля розпізнавання навантаження. З шунта S знімається сигнал, пропорційний струму навантаження. Цей сигнал подається на вхід U_S модуля розпізнавання навантаження і використовується для контролю замикання та розмикання реле термостату нагрівача, а також при вимірюванні потужності нагрівача в робочому стані. Сигнал, пропорційний напрузі мережі живлення, до якої підключено смарткон, подається на вхід U_L модуля розпізнавання навантаження.

У робочому стані при замкненому ключі $K1$ на нагрівач подається напруга мережі живлення U . Потужність, яка споживається із мережі живлення дорівнює

$$P = \frac{U^2}{R_H}. \quad (5.1)$$

При розімкненому ключі К1 послідовно з нагрівачем включено резистор $r \gg R_H$. При цьому потужність, яка споживається із мережі живлення дорівнює

$$\tilde{P} = \left(\frac{U}{R_H + r} \right)^2 R_H \approx \frac{U^2}{r^2} R_H. \quad (5.2)$$

Висловивши з цього рівняння R_H та підставляючи одержане значення в (5.1), одержуємо

$$P = \frac{U^4}{r^2} \tilde{P}^{-1} = \text{const} \cdot \tilde{P}^{-1}. \quad (5.3)$$

Таким чином потужність нагрівача може бути визначена, як величина зворотно пропорційна потужності \tilde{P} , яка споживається із мережі живлення при підключеному нагрівачі та розімкненому ключі К1. Цю величину модуль розпізнавання навантаження одержує прямим інтегруванням добутку миттєвих значень падіння напруги на нагрівачі $u_H(t)$ та струму, який протікає при розпізнаванні через нагрівач $i_H(t)$

$$\tilde{P} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) i_H(t) dt, \quad (5.4)$$

де T – інтервал усереднення потужності.

Струм, який протікає при розпізнаванні через нагрівач $i_H(t) \rightarrow 0$ має дуже малу амплітуду і тому його не можна вимірювати за допомогою шунта S з номінальним струмом порядку 10А. Величина струму $i_H(t)$, зважаючи на велике значення опору резистора r , може бути визначена пропорційно різниці $u(t) - u_H(t)$, а саме:

$$i_H = \frac{u(t) - u_H(t)}{r}. \quad (5.5)$$

Підставляючи це значення струму в (5.4), одержимо

$$\tilde{P} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) \frac{u(t) - u_H(t)}{r} dt. \quad (5.6)$$

В робочому стані при замкненому ключі К1 навантаження мережі визначається за формулою

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i_S(t) dt. \quad (5.7)$$

Для розпізнавання характеру навантаження вимірюється реактивна потужність

$$\tilde{Q} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H \left(t - \frac{1}{4f} \right) \frac{u(t) - u_H(t)}{r} dt, \quad (5.8)$$

де $f = 50$ Гц – частота напруги мережі живлення.

Якщо через смарткон підключено нагрівальний прилад, його реактивна потужність досить мала. Якщо через смарткон підключено комп'ютер, або холодильник, або якій-небудь електромеханічний прилад, його реактивна потужність значно вища. Якщо через смарткон підключено освітлювальний прилад, його реактивна потужність мала, але й активна потужність теж значно менша ніж 500 Вт – найменша потужність електроопалювального приладу.

При застосуванні мікропроцесорної техніки для задач електричних вимірювань, як показано в [37] виникають принципово нові похибки. Одна з таких похибок з'являється внаслідок неодночасності миттєвих вимірів струмів та напруг, що пов'язано з послідовним характером процесу обробки інформації мікропроцесором. Суть похибки неодночасності пояснює рис. 5.10.

Згідно з результатом, який одержано в [37] при синусоїдальних напрузі і струмі відносна похибка неодночасності вимірювань має значення

$$\delta_{\tau a} = (1 - \cos \omega \tau + \operatorname{tg} \varphi \sin \omega \tau) \times 100. \quad (5.9)$$

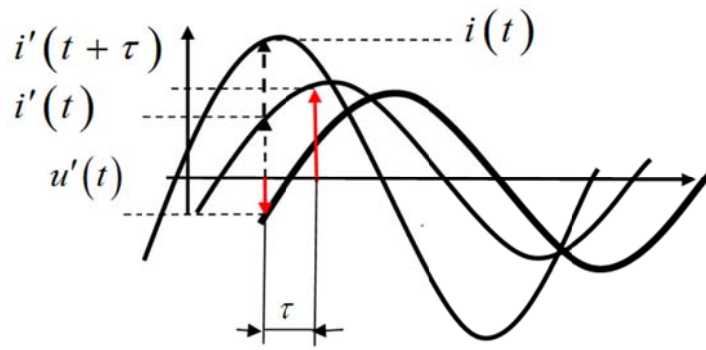


Рисунок 5.10 – Ілюстрація похибок вимірювань миттєвих значень на часовій діаграмі струмів та напруг (реальні виміри здійснюються в моменти, що вказані суцільними стрілками, пунктирною стрілкою вказано момент бажаного виміру струму)

Відносна похибка вимірювання реактивної енергії, що обумовлена відхиленням інтервалу часу між вибірками від значення $\frac{\pi}{2\omega}$ обчислюється за формулою

$$\delta_{tr} = (1 - \cos \omega\tau - \text{ctg} \varphi \sin \omega\tau) \times 100\%. \quad (5.10)$$

Для усунення цієї похибки запропоновано [38, 39, 40, 41] метод подвійного сканування. Згідно цьому методу період усереднення потужності T розбивається на два напівперіоди $\frac{T}{2}$ – два скани. У першому скані виміри здійснюються в одній послідовності (першою, наприклад, вимірюється напруга фази, а за нею струм тієї ж фази). У другому – послідовність вимірів змінюється на протилежну (рис. 5.11).

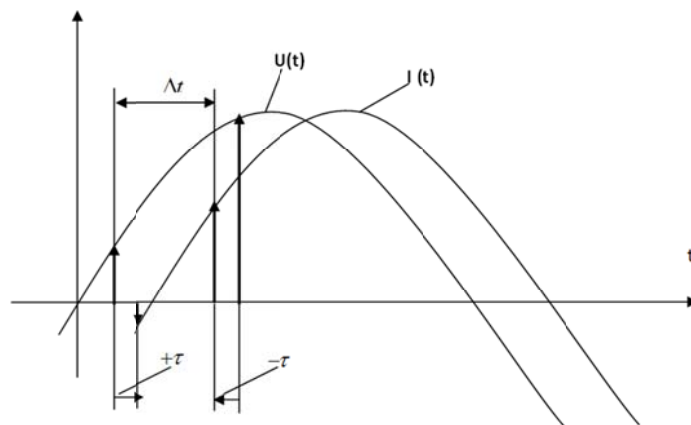


Рисунок 5.11 – Ілюстрація послідовності вимірів миттєвих значень струмів та напруг при подвійному скануванні

Тривалість кожного скану на рис. 5.11 позначено $\Delta t = \frac{T}{2}$. Енергія на інтервалі часу тривалістю $2\Delta t$ обчислюється за формулами

$$W_a = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\frac{\Delta t}{\tau}} u(\omega t_n) i(\omega t_n + \omega \tau) \tau + \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\frac{\Delta t}{\tau}} u(\omega t_m) i(\omega t_m - \omega \tau) \tau, \quad (5.11)$$

$$W_r = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\frac{\Delta t}{\tau}} u(\omega t_n) i\left(\omega t_n + \frac{\pi}{2} + \omega \tau\right) \tau - \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{\frac{\Delta t}{\tau}} u(\omega t_m) i\left(\omega t_m - \frac{\pi}{2} - \omega \tau\right) \tau, \quad (5.12)$$

де $n = 1, \dots, \frac{\Delta t}{\tau}$ номери вимірів у першому скані, $m = 1, \dots, \frac{\Delta t}{\tau}$ номери вимірів у другому скані.

За методом подвійного сканування похибка неодночасності вимірювань

$$\delta_{\tau a} = \delta_{\tau r} = \delta_{\tau} = (1 - \cos \omega \tau) \times 100\%. \quad (5.13)$$

Метод подвійного сканування дозволяє знизити відносну похибку неодночасності при обчисленні активної потужності на величину $100\% \cdot tg \varphi \sin \omega \tau$, а при обчисленні реактивної потужності на величину $100\% \cdot ctg \varphi \sin \omega \tau$.

Застосування методу подвійного сканування до задачі розпізнавання навантаження означає, що напруги $u_L(t)$ та $u_H(t)$ вимірюються у різній послідовності почергово, а результати цих вимірювань підсумовуються та діляться на 2.

$$\tilde{P} = \frac{1}{2T} \int_0^T u_H(t + \tau) \frac{u(t) - u_H(t + \tau)}{r} dt + \frac{1}{2T} \int_0^T u_H(t - \tau) \frac{u(t) - u_H(t - \tau)}{r} dt.$$

В цьому випадку на відзнаку від випадків, що розглянуто у [4...6], потужність має додаткову складову

$$\Delta \tilde{P} = \frac{1}{2T} \int_0^T -\frac{u_H^2}{r}(t + \tau) dt + \frac{1}{2T} \int_0^T -\frac{u_H^2}{r}(t - \tau) dt,$$

Покажемо, що відносна похибка цього додатку при застосуванні методу подвійного сканування у відношенні активної та реактивної потужності при синусоїдальному струмі дорівнює нулю

$$\begin{aligned}\delta(\Delta\tilde{P}) &= \delta(\Delta\tilde{Q}) = \int_0^T [1 - \sin^2(\omega t + \omega\tau) - \sin^2(\omega t - \omega\tau)] dt = \\ &= \int_0^T [1 - 1 + \cos(2\omega t)] dt = 0.\end{aligned}$$

Таким чином, застосування методу чотирьохполюсника по схемі, як показано на рис. 5.9, дає можливість вимірювати активну та реактивну потужність обладнання, яке підключено до електричної мережі живлення через смартфон, ще до подавання на це обладнання робочого струму. Необхідна точність вимірювання потужності при неодноточасному вимірюванні вхідної та вихідної напруги чотирьохполюсника досягається завдяки застосуванню методу подвійного сканування.

Алгоритм функціонування інтелектуального вимірювача електричної потужності у складі смартфона показано на рис. 5.12.

5.4 Принципи побудови інформаційної мережі розумного теплового поля

Зважаючи на те, що опалювальні пристрої підключено до загальної мережі живлення, має сенс використання цієї мережі для обміну інформацією між всіма компонентами розумного теплового поля. Така технологія побудови інформаційної мережі має назву Power Line Communication (PLC). В розроблених дослідних зразках смартфонів та мережевого контролера для побудови PLC – мережі використовується мікросхема KP1446XK1.

Мікросхема KP1446XK1 виконує функцію прийому і передачі цифрової інформації по мережах змінного струму 110,380 V.

Швидкість передачі може приймати одне з чотирьох можливих значень: 124 біт/сек; 248 біт/сек; 496 біт/сек; 992 біт/сек і задається під час програмування приймача.

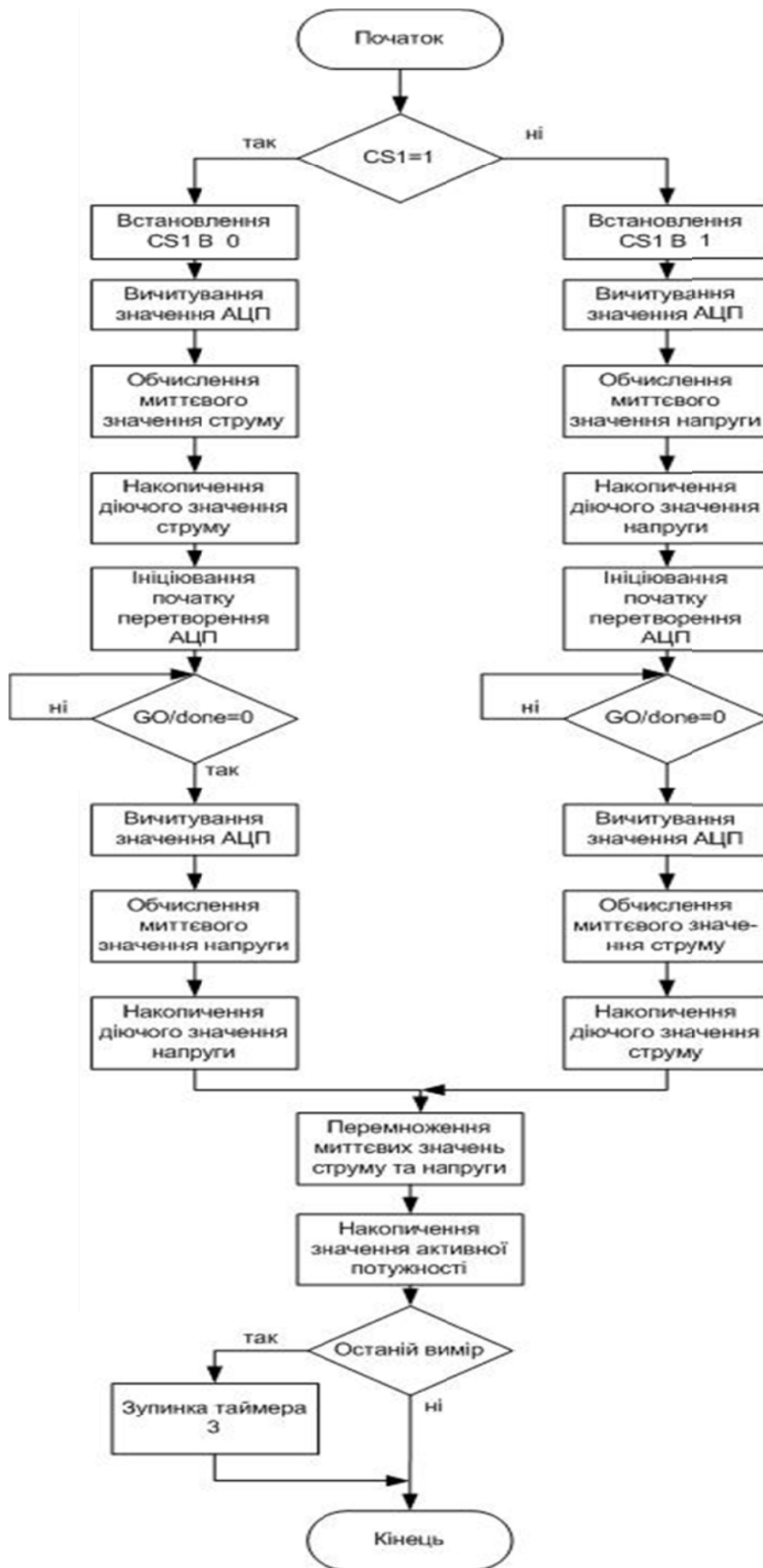


Рисунок 5.12 – Алгоритм вимірювання потужності

В мережевому приймально-передавачеві використовується перешкодо- захищене кодування цифрової інформації для виправлення одиночних і виявлення подвійних помилок, які можуть виникати при передачі, через перешкоди в мережі.

Приймач дозволяє використовувати вже наявні лінії силової електромережі для створення: систем збору інформації, локальних мереж передачі даних, систем централізованого контролю і управління електрообладнанням, систем охорони і сигналізації.

Основні характеристики мікросхеми КР1446ХК1:

- використання частотної маніпуляції для передачі інформації;
- можливість вибору несучої частоти;
- програмована швидкість передачі до 992 біт/сек;
- перешкодо захищене кодування інформації: виправлення одиночних та подвійних помилок;
- стандартний 22-вивідний DIP корпус.

Передача інформації здійснюється за допомогою частотної маніпуляції сигналу «1» і «0», які передаються різними частотами, що незначно відрізняються від центральної частоти у більшу і меншу сторону (табл. 5.1). Частотно-маніпульований сигнал через трансформатор, що гальванічно розв'язує, передається в лінію 110,380 В. Буферний каскад призначений для узгодження високого вихідного опору мікросхеми з низьким вхідним опором лінії при передачі сигналу в лінію і для фільтрації.

Таблиця 5.1 – Частоти маніпуляції, з якими здійснюється передача сигналів

Центральна частота	Частота передачі «0»	Частота передачі «1»
66,66 кГц	62,5 кГц	71,43 кГц
100 кГц	95,24 кГц	105,26 кГц
133,33 кГц	129,03 кГц	137,93 кГц

Прийом інформації

Приймач постійно аналізує дані, що приходять на вхід. Якщо приходить код слова синхронізації, а за ним код адреси, який збігається з власною адресою (або із загальною адресою = 10111001), то наступні за ними 2 байта інформації, вважаються призначеними даному приймально-передавачеві, вони записуються в буфер прийому, а на виході RX приймач виставляє високий рівень сигналу, що є прапором того, що отримана нова інформація. В результаті перешкод в мережі можливо спотворення інформації. У кожному з прийнятих байтів (адреса і дані) приймач виправляє помилки в одному біту і виявляє подвійні помилки. Отримана інформація буде зберігатися в буфері прийому і може бути прочитана одноразово або багаторазово в будь-який зручний час незалежно від роботи блоків приймача і передавача.

Протокол обміну з використанням інтерфейсу PLC для системи управління нагрівачами.

За основу протоколу обміну по PLC узятий протокол Modbus, але модифікований для умов застосування спільно з мікросхемою KP1446XK1. Особливістю застосування даної мікросхеми є низька швидкість обміну, через надмірність службових символів в елементарній послідовності, а також наявність перешкодо-захисту в апаратній реалізації зв'язкового протоколу. Крім цього в розрахунок приймалося те, що обмін з модулем WI-FI проводиться так само по протоколу Modbus.

Так як PLC не забезпечує рівнодоступність до каналу зв'язку, то обмін інформацією здійснюється за принципом Master-Slave. Для обміну використовуються дві функції: читання і запис регістрів. Адреса смарткона формується в заголовку PLC, після преамбули і слова синхронізації, апаратно. Тайм-аут, що розділяє повідомлення, утворюється автоматично через перехід на обмін з іншим контролером. При обміні повідомленнями послідовність складається з Заголовка і Даних. Заголовок складається з 2 байт. Перший байт вказує номер функції 01 читання 10 запис в сьомому та шостому бітах першого байта. Молодші п'ять розрядів першого байта вказують довжину повідомлення.

Другий байт вказує початкову адресу регістрів куди записується або звідки вичитується інформація. Довжина регістрів 16 біт.

При читанні інформації зі смарткона вимірювач загальної споживаної потужності (ВПЗП) об'єктом (Master) передає запит, де вказує функцію читання, кількість регістрів для читання, і початкову адресу, з якого виконується читання. Смарткон (Slave) відповідає відразу, після запиту таким же заголовком та передає дані за результатами запитів. Якщо протягом двох посилок смарткон не відповідає, ВПЗП вважає, що контролер відсутній. При запису інформації ВПЗП посилає заголовок і відразу ж за ним дані. Смарткон підтверджує прийом заголовком. ВПЗП чекає заголовок протягом часу рівному півтора посліжки приходу повідомлення. У 32 регістрах по можливості розміщуються всі змінні і масиви для налагодження і переналагодження смартконів і ВПЗП.

У пам'яті даних ВПЗП регістри смартконів відображаються на масив з 576 байт. Таким чином, читаючи і записуючи дані в цей масив ми можемо обмінюватися інформацією з будь-яким смартконом, так само як і з ВПЗП.

Так як PLC забезпечує задану достовірність обміну інформацією, то контрольна сума в кінці повідомлень не передається. Контроль правильності обміну проводиться за кількістю прийнятих байт повідомлень до тайм-аута. В кінці прийому проводиться порівняння кількості прийнятих байт і байт зазначених в довжині повідомлення. Така побудова протоколу дозволяє легко перетворювати посліжки одержувані або передані по PLC в посліжки обміну з модулем WI-FI або з персональним комп'ютером з інтерфейсом RS-485 і протоколом Modbus.

Висновок

Аналізуючи сучасні тенденції розвитку інформаційно-керуючих систем, можна очікувати у найближчий час у різних галузях значного поширення досліджень, розробок і втілень мереже-центричних кіберфізичних систем. Їх найбільш важливими властивостями є розосереджена структура, відкритість, самоорганізація, слабка ієрархія у контурі прийняття рішень, емерджентність та інтеграція розосереджених обчислювальних ресурсів в фізичні процеси.

Концепція кіберфізичної системи «розумне теплове поле» заснована на інтеграції розосереджених обчислювальних ресурсів в фізичні процеси перетворення електричної енергії в теплову та її розподілення між зонами опалювального об'єкта. Характерною рисою цієї концепції є колективна поведінка автоматів, які керують подачею енергії до розосереджених джерел тепла. Метою функціонування системи «розумне теплове поле» є таке керування тепловими потоками з урахуванням обмежень потужності електричного живлення, що забезпечує заданий розподіл температур в просторі і часі опалювального об'єкта. Такий підхід до побудови інтелектуальної мережі прямого електричного опалення приміщень забезпечує потрібний рівень її ефективності, гнучкості, надійності та живучості при автоматичному розподілі обмеженої потужності, лімітований рівень якої випадково змінюється у часі.

В даній роботі розглянуто два варіанти побудови алгоритму автоматичного розподілення енергії між джерелами тепла у розумному тепловому полі. Один з них спирається на ідею самоорганізації теплового поля, яка здійснюється під впливом колективних мод: середньої «ціни» електричної потужності, сумарної поточної потужності теплового поля та граничної поточної потужності, що може бути використана джерелами тепла. Ці величини відіграють роль параметрів порядку теплового поля. Кожен автомат розумного теплового поля приймає рішення відносно стану керованого ним джерела тепла, зважаючи на вказані вище параметри порядку та стан «власного» джерела тепла. Інший варіант побудови алгоритму передбачає створення в мережі розумного теплового поля коаліційних груп з розподіленням енергії із

синхронізацією роботи обігрівачів за часом в багатоканальній системі масового обслуговування.

Запропонований в роботі згідно першому підходу автомат з білінійною тактикою в якості колективного агента інтелектуальної мережі прямого електричного опалення забезпечує самоорганізацію цієї мережі з поліноміальною швидкістю і досягнення між всіма агентами (без обмеження їх кількості) рівноваги по типу рівноваги Неша, при якій залишок невикористаної потужності не може бути використано жодним агентом.

Дослідження ефективності запропонованого алгоритму розподілення енергії із синхронізацією роботи обігрівачів за часом в багатоканальній системі масового обслуговування показало його ефективність за умовою, що період зміни обмеження потужності, яка виділяється для обігрівачів, та період зміни умов обігріву приміщень будуть щонайменш у півтора рази більше часу синхронізації роботи обігрівачів.

Результати імітаційного моделювання поведінки розумного теплового поля в різних умовах дають підстави для висновку, що перший варіант побудови алгоритму доцільно використовувати в розосереджених мережах прямого опалення з відносно великою кількістю джерел тепла. Напроти, алгоритм за другим варіантом доцільно використовувати в мережах прямого опалення з відносно невеликою кількістю джерел тепла. Залишок нерозподіленої потужності при такому підході може бути зменшено майже до оптимального рівня за рахунок сумісних дій автоматів, об'єднаних у коаліційні групи.

Результати імітаційного моделювання теплових процесів та поведінки децентралізованої інтелектуальної мережі прямого електричного опалення приміщень в процесі самоорганізації на прикладі системи опалення 3-х кімнатної квартири загальною площею 60 кв.м. з урахуванням випадкових змін ліміту потужності, що використовується на обігрів, в межах від 2,3 кВт до 3,5 кВт при температурі зовнішнього повітря 0°C та -20°C , показали, що система автоматично забезпечує підтримку комфортних температур

($+20^{\circ}\text{C}$ +... $+22^{\circ}\text{C}$) одночасно у всіх кімнатах, не допускаючи перевищення ліміту електричної потужності. Термін окупності розумного теплового поля для опалення вказаного приміщення у порівнянні з централізованим теплопостачанням згідно з результатами моделювання не перевищує 5 місяців.

Ця книга починається з прикладів деяких життєвих ситуацій, які сталися з вигаданими нами особами: дівчиною Анною, дослідником Денисом, та пересічною жінкою Емілією. Ці ситуації вимушують наших героїв міркувати над проблемою покращення умов життя за рахунок більш якісного, комфортного та економічного опалення житлових приміщень. Вони мріють *«Про те, щоб потужність прямого електричного опалення автоматично розподілялася в просторі опалювального об'єкта відповідно до пріоритетів тих, хто ним користується. А також про те, щоб величина цієї потужності автоматично підтримувалася на такому рівні, при якому сумарне електроспоживання опалювального об'єкта не перевищувало б встановлений ліміт. І ще про те, щоб зменшити плату за тепло»*.

Нам здається, що концепція розумного теплового поля у контексті мереже-центричних кіберфізичних систем здатна втілити ці та інші подібні очікування в реальність.

Перелік посилань

1. Georgii Geletukha, Tetiana Zheliezna, Anatolii Bashtovyi. Analysis of tariff setting in the district heating sector of EU countries. UABio Position Paper N 14, 09.02.2016. (URL:<http://www.uabio.org/activity/uabio-analytics>).
2. Мельник А.О. Кіберфізичні системи: проблеми створення та напрями розвитку. Lviv Polytechnic National University Institutional Repository <http://ena.lp.edu.ua>, 2014, С. 154–161.
3. Edward Lee, Cyber Physical Systems: Design Challenges // University of California, Berkeley, Technical Report No. UCB/EECS–2008–86, January 23, 2008.
4. Lee, E.A., Seshia, S.A.: Introduction to Embedded Systems A Cyber–Physical Systems Approach. LeeSeshia.org, 2011.
5. Цветков В.Я. Распределенное интеллектуальное управление. Государственный советник, 2017, №1, С.16–22.
6. Цветков В. Я. Субсидиарное управление// Современные технологии управления. – №1 (73). – С.6–12.
7. Мулюха В.А., Заборовский В.С, Ильяшенко А.С, Лукашин А.А. Сетевый метод организации информационного взаимодействия киберфизических объектов в среде облачных вычислений // Робототехника и техническая кибернетика. –2014. – 3(4). – С.43–47.
8. Абрамчук С.И. Энергетическая эффективность электрического обогревателя / Абрамчук С.И., Пуговкин А.В.// Доклады ТУСУР. – 2014, № 4 (34). – С. 211–214.
9. Пуговкин А.В. Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения / Пуговкин А.В., Купреков С.В., Абушкин Д.В., Заречная И.А, Муслимова Н.И.// Доклады ТУСУР. – 2010, № 2 (22), часть 1. – С. 293–298.
10. Тепловые процессы. Лабораторный практикум. Методические указания. Электронный ресурс: <https://www.isuct.ru/dept/chemkiber/piaht/metodwork/newmet/3.htm>
11. Aleksander M. Zaslavsky, Viktor V. Tkachov, Stanislav M. Protsenko, Andrii V. Bublikov, Batyrbek Suleimenov, Nurbek Orshubekov, Konrad Gromaszek, Self-organizing intelligent network of smart electrical heating devices as an alternative to traditional ways of heating. Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017, 104456K (7 August 2017); doi: 10.1117/12.2281225; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2281225>
12. А.М.Заславский, В.В.Ткачѳв, А.В.Бубликов, О.В.Карпенко. Оптимальное распределение энергии в интеллектуальной сети прямого электрического

отопления. Электротехнические и компьютерные системы, Одеський національний політехнічний університет, – 2017, № 25 (101), – С.358–366.

13. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Эдиториал УРСС, 2005. – 400 с.

14. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения, – М.: Сов. радио, – 1971. – 520 с.

15. Г.Хакен, Синергетика, – М.: «Мир», – 1980, – с. 404.

16. Г.Хакен, Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам, – М.: Ком Книга, – 2005, – с.248.

17. Брауэр В. Введение в теорию конечных автоматов, – М.: Радио и связь, 1987, – с.392.

18. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем, – М.: Наука, – 1969, – с.316.

19. Цетлин М.Л. Некоторые задачи о поведении конечных автоматов//Доклады АН СССР. – 1963. – Т.139, – №4.

20. Крылов В.Ю. Об одном стохастическом автомате, асимптотически оптимальном в случайной среде/ Автоматика и телемеханика. – 1963. – Т. 24, № 9. – С. 1226–1228

21. Гинзбург С.Д., Крылов В.Ю., Цетлин М.Л. Об одном примере игры многих одинаковых автоматов / Автоматика и телемеханика. – 1964. – Т.25, №5.

22. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. – М: Наука, 1973.

23. Ткачев В.В., Огеенко П.Ю., Лозовягин А.В. Децентрализованные модели распределения ограниченного ресурса на базе технологии CAN-шины // Збірник наукових праць НГУ. – 2011. – № 36, т.1. – С. 141–150.

24. Г.Г.Півняк, С.М.Проценко, М.І.Стаднік, В.В.Ткачов, Децентралізоване керування: Монографія. – Д.: Національний гірничий університет, 2007. – 107 с.

25. Zaslavski A.M., Ogeyenko P.Yu., Tokar L.A. Collective behaviour of automatic machines and the problem of resource allocation with limitation of “all or nothing” type / Energy Efficiency Improvement Of Geotechnical Systems – London, Taylor & Francis Group, 2013.

26. Заславский А.М. Коллективное поведение автоматов в задаче распределения электроэнергии при веерном отключении / Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании. Труды X Байкальской Всероссийской Конференции. – 2005, С. 261–266.

27. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977 – 256 с.

28. Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Шевкопляс Е. В. Теория игр — СПб: БХВ – Петербург, – 2012, – 432 с.

29. Бубликов А.В. Идентификация имитационной модели «электрический обогреватель – комната» с использованием компьютерных инструментальных средств / А.В. Бубликов, С.Н. Проценко, О.В. Карпенко // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2016: тези доповідей Одинадцятої міжнародної науково–практичної конференції (Жукин, 27 червня – 1 липня 2016 р.) / М-во осв. і наук. України, Нац. Акад. наук України, Академія технологічних наук України, Інженерна академія України та ін. – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – С. 215 – 219.

30. Действующая методика испытания отопительных приборов / В.И. Сасин, Г.А. Бершидский, Т.Н. Прокопенко, Б.В. Швецов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pkf-sk.ru/articles.php?id=365.html>, свободный (дата обращения: 22.11.2014).

31. [URL:http://i2hard.ru/blogs/umnaya-rozetka-senseit-gs2-dlya-udalennogo-upravleniya-elektropriborami](http://i2hard.ru/blogs/umnaya-rozetka-senseit-gs2-dlya-udalennogo-upravleniya-elektropriborami).

32. [URL:http://electricalschool.info/spravochnik/apparaty/1553-rele-prioriteta-nagruzok.html](http://electricalschool.info/spravochnik/apparaty/1553-rele-prioriteta-nagruzok.html).

33. [URL:http://www.valleywinds.ru/no-break-power/add-power](http://www.valleywinds.ru/no-break-power/add-power).

34. [URL:http://mirtepla.io.ua/s848505/modul_raspredeleniya_moshchnosti_wolter_protect_ek](http://mirtepla.io.ua/s848505/modul_raspredeleniya_moshchnosti_wolter_protect_ek).

35. Патент на корисну модель № 121870. Спосіб управління електричними нагрівальними пристроями.

36. О.М.Заславський, С.М.Проценко, О.В.Карпенко, М.В.Козарь, Автоматичне вимірювання потужності обладнання, підключеного до інтелектуальної мережі прямого електричного опалення. Одеський національний політехнічний університет, – 2017, – № 25 (101), – С. 381–387.

37. Кухарчук В.В., Заславський О.М. Комп'ютеризована система обліку електричної енергії: (монографія). – Вінниця: ВНТУ, – 2012. – 152 с.

38. Патент України на винахід № 28106, 1998. опубл.16.10.2000. Бюл. № 5.

39. Патент России на изобретение № 2143701, опубл. 27.12.1999. Бюл. №36.

40. Заславський О.М. Вимірювання електричної енергії методом безпосереднього інтегрування та подвійного сканування миттєвих значень струму та напруги / О.М. Заславський, В.В Кухарчук // Оптико-електронні інформаційно–енергетичні технології. – 2008. – № 1 (15). – С. 191 – 196.

41. Zaslavsky A.M. Double scanning method in the problem of digital power measurement of an alternating current // Actual Problems of Measuring Technique “Measurement – 98”. Proceeding of the International Conference. – Kyiv: NTUU “KPI”, AUS DAAD, 1998. – P.86 – 87.

Наукове видання

Бубліков Андрій Вікторович

Заславський Олександр Михайлович

Проценко Станіслав Миколайович

Ткачов Віктор Васильович

РОЗУМНІ ТЕПЛОВІ ПОЛЯ

Монографія

Видано в редакції авторів

Підписано до друку 02.04.2018. Формат 30x42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 10,0.
Обл.-вид. арк. 10,0. Тираж 30 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та надруковано
у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка»
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19