

УДК 004.021:004.94

© А.В. Бубликов, С.М. Проценко, О.В. Карпенко, Р.А. Мазур

## **АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ОБІГРІВАЧАМИ ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМАЛЬНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЇХ РОБОТИ**

© A. Bublikov, S. Protsenko, O. Karpenko, R. Mazur

### **THE ALGORITHM OF CONTROL BY HEATERS BASED ON CRITERION OF MAXIMAL SYNCHRONIZATION OF THEIR WORK**

Описаний алгоритм керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи та наведені результати перевірки ефективності запропонованого алгоритму за допомогою імітаційного моделювання.

Описан алгоритм управления нагревателями по критерию максимальной синхронизации их работы и приведены результаты проверки эффективности предложенного алгоритма с помощью имитационного моделирования.

**Вступ.** Одним з найбільш перспективних і швидкозростаючих видів опалення є пряме електричне опалення. У сучасних системах типу «Розумний будинок» застосовується зонне управління температурою, коли користувач дистанційно встановлює добовий графік температур в кожній кімнаті, а wi-fi термостати забезпечують виконання цього графіка. Існує досить багато рішень стосовно реалізації керування електричним опаленням [1-3], але усі вони не дозволяють користувачеві встановлювати обмеження щодо споживаного енергоресурсу та проводити оптимізацію процесу його розподілу з урахуванням цього обмеження, що для умов України є актуальним питанням з оглядом на вартість енергоресурсу.

В умовах обмеження енергоресурсу неправильно буде припускати, що кожен споживач електроенергії може запросити енергоресурс без обмежень за його максимальним значенням. Ці обмеження залежать від структури та характеристики енергетичної мережі, або вони можуть бути економічного характеру. Тому за умови прямого електричного опалення ключовим стає завдання побудови грамотної стратегії опалення, щоб мати відповідь на питання як розподіляти енергоресурс між споживачами для забезпечення комфортного температурного режиму в усіх зонах обігріву з урахуванням технічних і економічних обмежень, що постійно змінюються.

Задачі підвищення гнучкості системи електропостачання шляхом реалізації принципу «інтелектуальних мереж», а також запровадження вимог щодо рівня енергоефективності побутового, офісного та опалювального обладнання, енерговикористання у будівлях відносяться до пріоритетних задач розвитку електроенергетичної галузі згідно енергетичної стратегії України на період до 2035 року.

**Формулювання мети статті (постановка завдання).** Перевищення ліміту потужності можна уникнути, синхронізуючи роботу нагрівальних пристроїв між собою та з іншими електроспоживачами за допомогою «інтелектуальної мережі» електропостачання таким чином, 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.).

За умови синхронізації роботи обігрівачів між собою стоїть завдання максимального використання виділеного енергоресурсу протягом тривалого часу. Це завдання ускладнюється тим, що енергоресурс, виділений обігрівачам, постійно змінюється непередбачуваним чином, коли вмикаються та вимикаються інші електричні пристрої. Крім того, постійно та непередбачувано змінюються режими роботи самих обігрівачів в залежності від протікання процесів обігріву приміщень.

Тому у статті поставлено за мету розробити алгоритм керування розподілом енергоресурсу між обігрівачами, який дозволить максимально використувати виділений для електричного обігріву енергоресурс в умовах зміни непередбачуваним чином кількості даного енергоресурсу та режимів роботи обігрівачів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Алгоритм керування обігрівачами за критерієм максимальної синхронізації їх роботи створюється для умов централізованого керування на основі контролера мережі, що встановлюється на вході сегменту електричної 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 Smart-конекторів (розумних розеток) 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.

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  $P_{\text{лім.}}$ :

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

Задачу максимізації використання виділеного енергоресурсу ускладнює той факт, що у формулі (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 (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 запропонований 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 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.1. Починається алгоритм з процедури формування “груп обігрівачів” за їхньою потужністю, яка виконується у підпрограмі з відповідною назвою (блок 2 на рис.1). Згідно з цією процедурою, виділений загальний енергоресурс умовно розділяється на частини, розмір яких відповідає потужностям активних обігрівачів, що підключені до Smart-конекторів. Розділення загального енергоресурсу на частини відбувається за критерієм максимального використання цього ресурсу згідно з формулою (1).

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

Наприклад, до Smart-конекторів 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 (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.

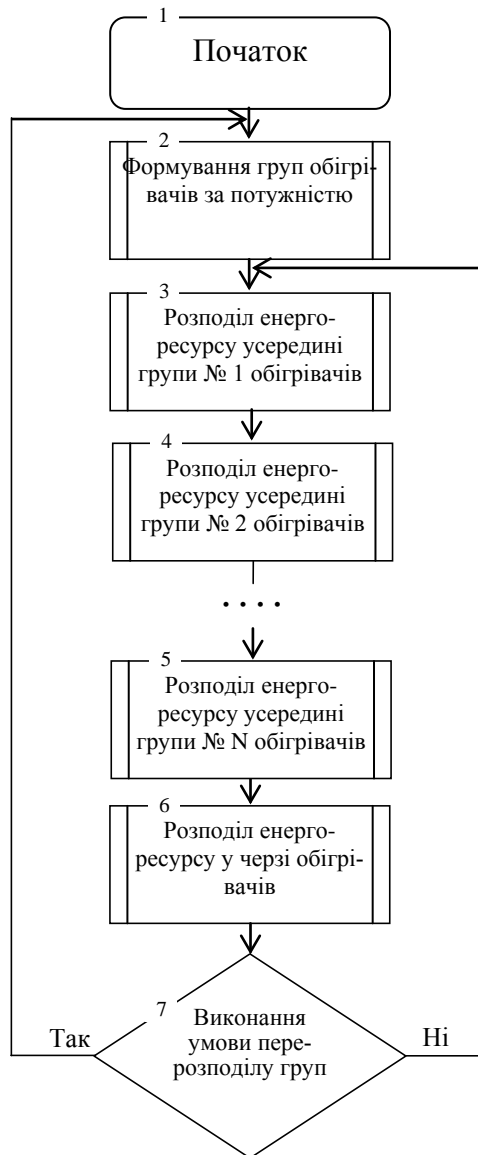


Рис. 1. Блок-схема основної частини евристичного алгоритму розподілу енергоресурсу між обігрівачами з синхронізацією їх роботи за часом

Рішення щодо виділення відповідної частини загального енергоресурсу групою тому чи іншому обігрівачу приймається у результаті виконання підпрограм у блоках 3-5 на рис.1. Особливість алгоритму розподілу частини загального енергоресурсу усередині “групи” у тому, що одному з обігрівачів групою присвоюється статус, який дозволяє цьому обігрівачу завжди отримувати енер-

горесурс, 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 так звану “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.1.

У блоці 7 на рис.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”.

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 (опис моделі та параметрів зон обігріву наведені у [4]).

Проаналізуємо результати імітаційного моделювання роботи системи керування розподілом енергоресурсу між вісьмома зонами обігріву багатофункціональної будівлі на основі запропонованого алгоритму розподілення енергоресурсу із синхронізацією роботи обігрівачів за часом (рис.1).

На рис.2 представлена динаміка сумарних потужностей обігрівачів у “групах” та у “черзі” після синхронізації роботи усіх обігрівачів у “групах”. Із рис.2,а 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.2,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”.

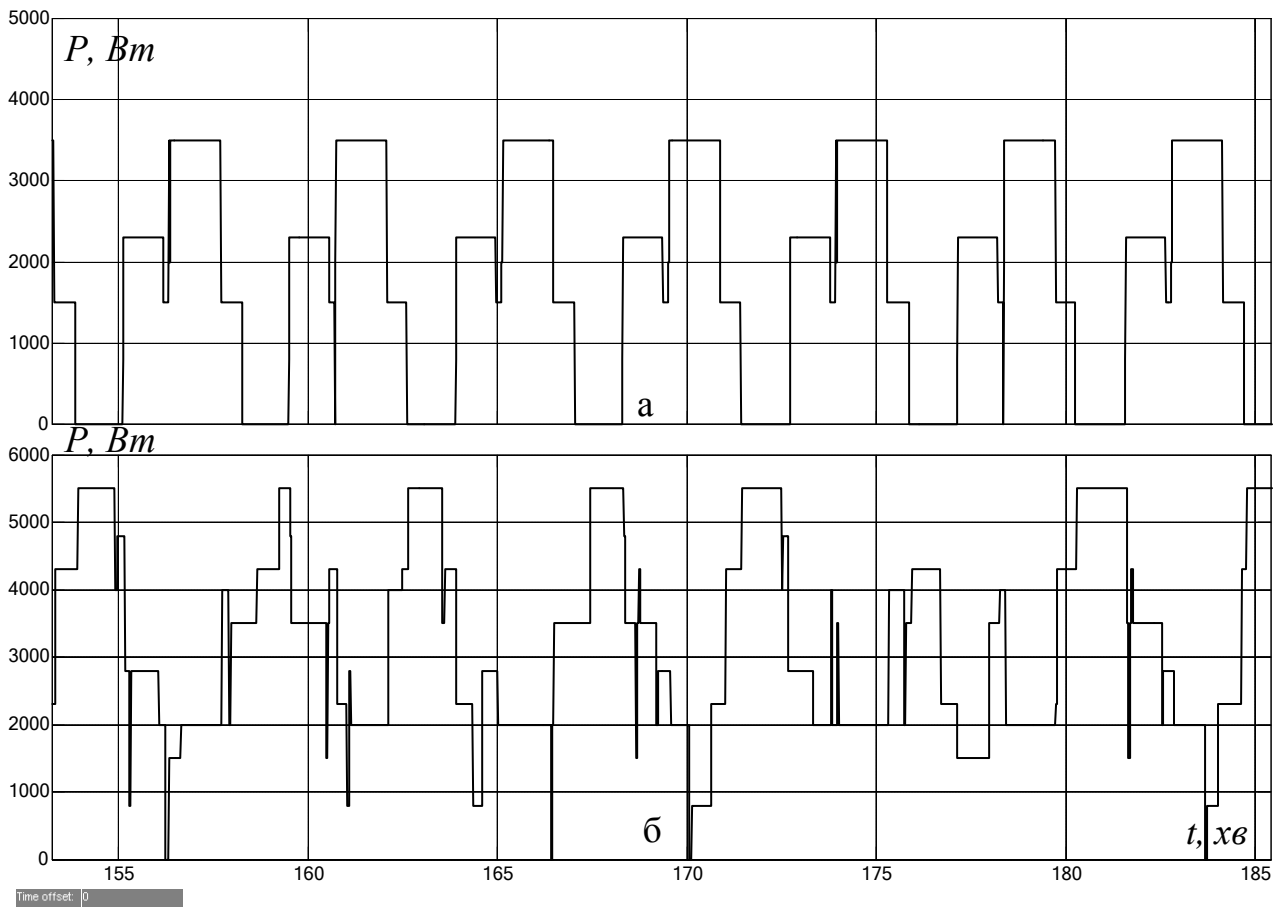


Рис. 2. Зміна у часі: а – сумарної потужності обігрівачів у “групах”; б – сумарної потужності обігрівачів у “черзі”

Також проаналізуємо зміну у часі сумарної потужності усіх обігрівачів (рис.3). 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 вимкання обігрівача із “черги” приймається на основі інформації про вмикання або вимкання одного з обігрівачів у “групах”, яка надходить із незначним запізненням (крок моделювання у даному випадку прийнятий 1 с). Також із рис.3 та на основі статис-

тичної 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.

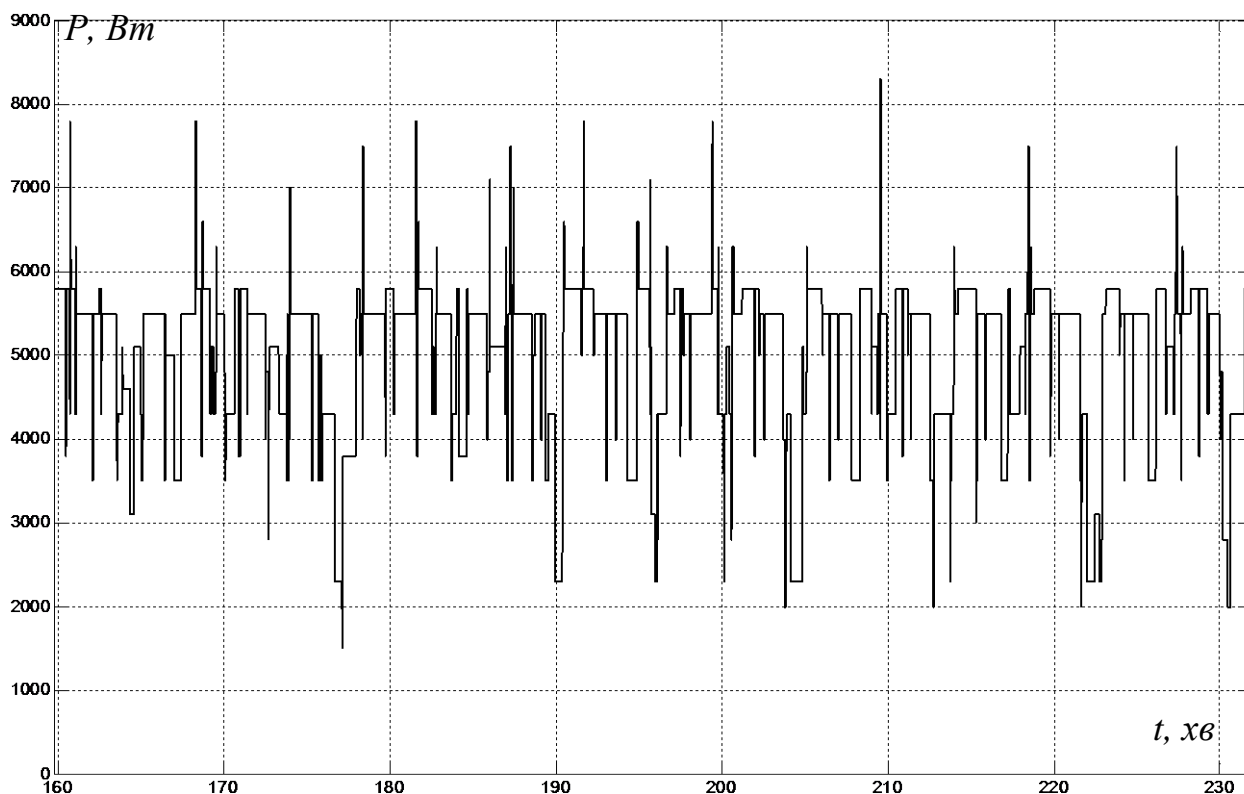


Рис. 3. Зміна у часі сумарної потужності обігрівачів

Далі на основі рис.4 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,б, рис.4,в, рис.4,г та рис.4,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%.

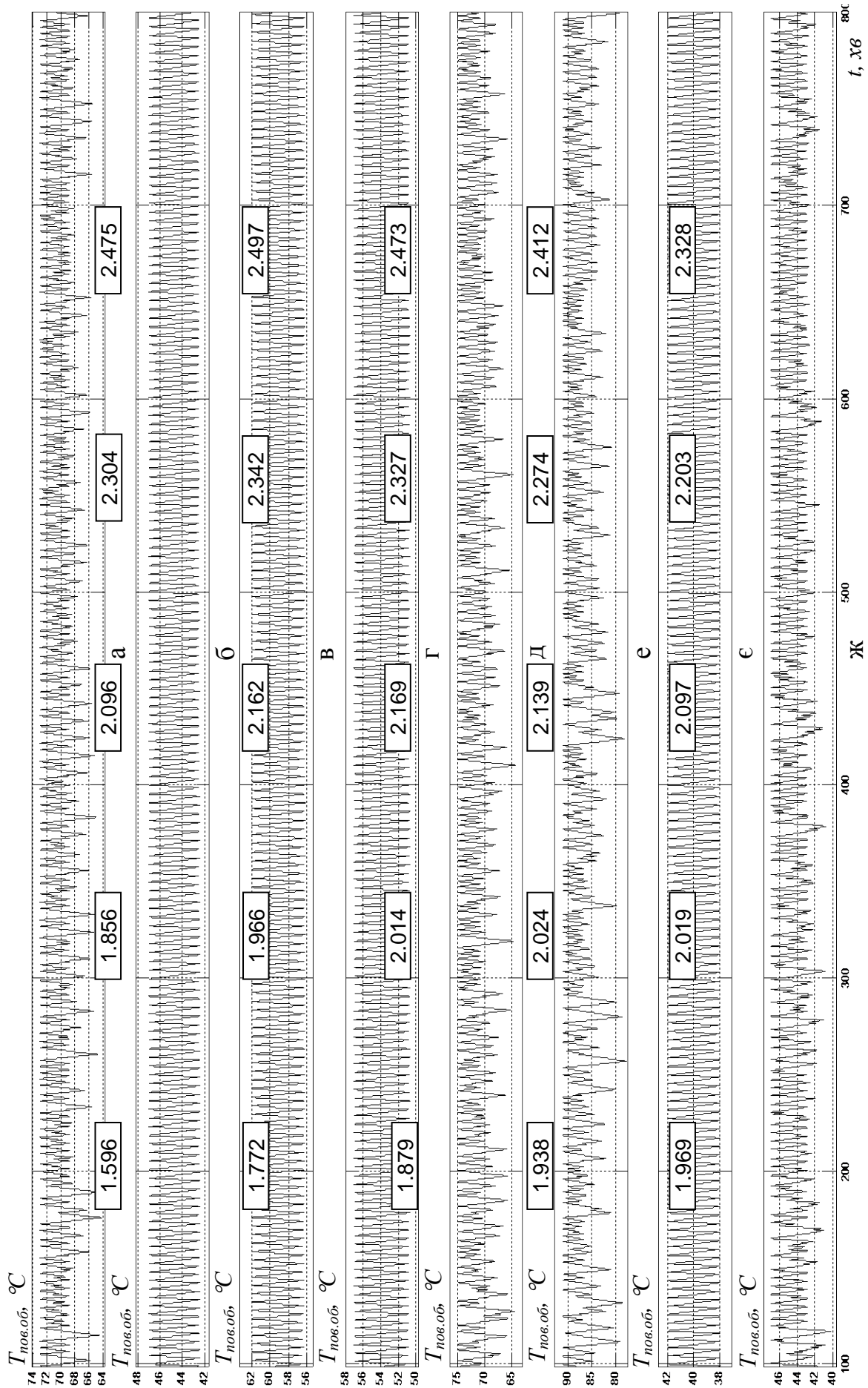


Рис. 4. Зміна у часі температури поверхні: а – I-го обігрівача; б – II-го обігрівача; в – III-го обігрівача; г – IV-го обігрівача; д – V-го обігрівача; е – VI-го обігрівача; ж – VIII-го обігрівача



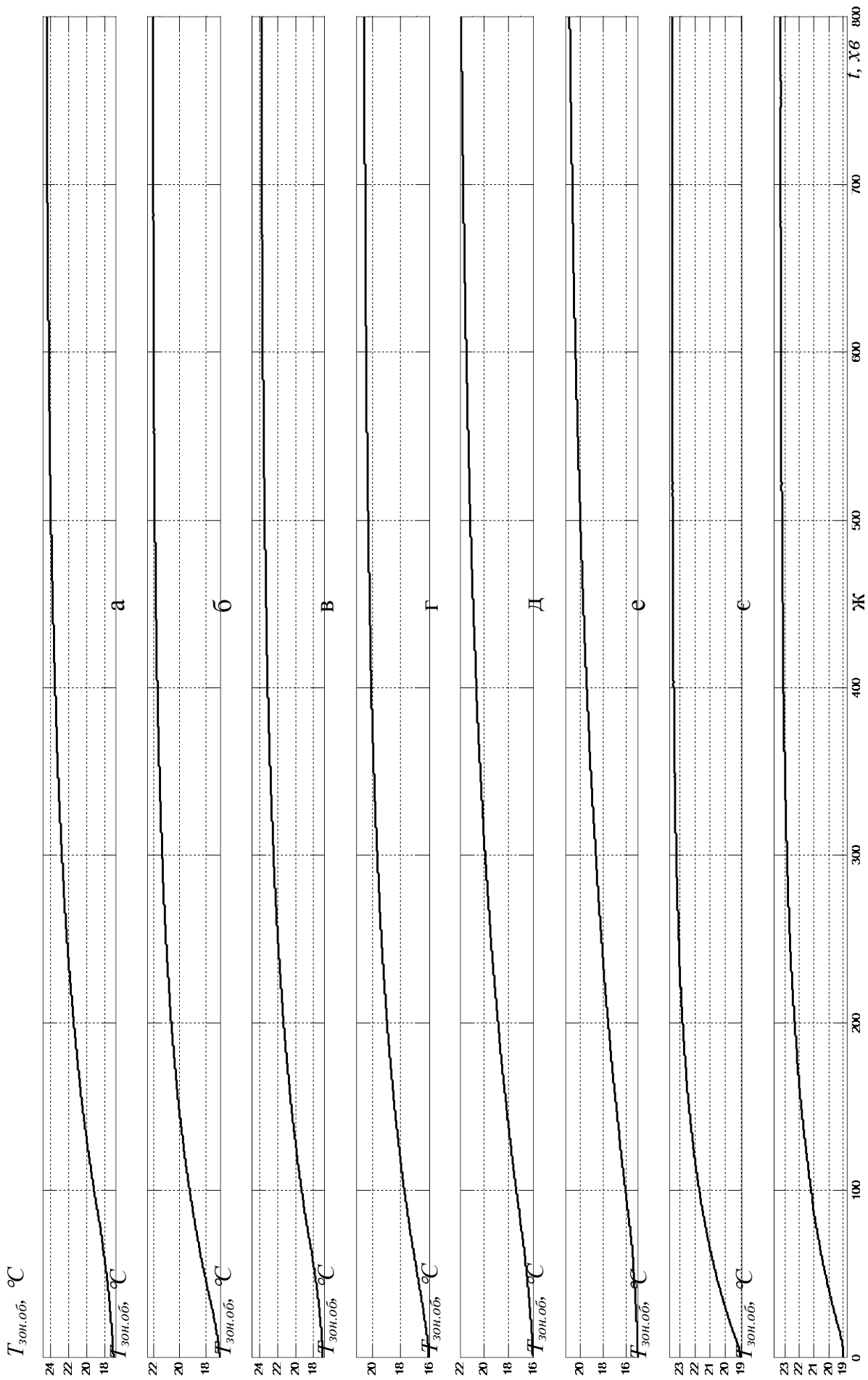


Рис. 5. Зміна у часі температури: а – I-ої зони обігріву; б – II-ої зони обігріву; в – III-ої зони обігріву; г – IV-ої зони обігріву; д – V-ої зони обігріву; е – VI-ої зони обігріву; є – VII-ої зони обігріву; ж – VIII-ої зони обігріву

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, можуть бути досить значними. У такому разі протягом не тривалих інтервалів часу (до 5 хвилин) спостерігається відхилення фактичних температур поверхонь обігрівачів від заданих значень у сторону зменшення на 5-10 °С. 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, короткочасні відхилення фактичних температур поверхонь обігрівачів на 5-10 °С 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.5 показана фактична динаміка нагріву усіх приміщень. Із рис.5,а, рис.5,б та рис.5,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.5,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.

#### **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.

**Перелік посилань**

1. Geletukha G. Analysis of tariff setting in the district heating sector of EU countries [Електронний ресурс] / Georgii Geletukha, Tetiana Zheliezna, Anatolii Bashtovyi // UABio Position Paper — 2016. — № 14. — С. 41. — Режим доступу до журн. : <http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-14-en.pdf>
2. Callaway Duncan S. Achieving Controllability of Electric Loads [Електронний ресурс] / Duncan S. Callaway, Ian A. Hiskens // Proceedings of the IEEE. — 2011. — Vol. 99, №1. — Р. 184–199. — Режим доступу до статті : <http://web.eecs.umich.edu/~hiskens/publications/05643088.pdf>
3. Guillaume G. A Complex System Approach for Smart Grid Analysis and Modeling [електронний ресурс] / Guillaume Guerard, Souan Ben Amor, and Alain Bui // DOI: 10.3233/978-1-61499-105-2-788 Conference: Advances in Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems — 16th Annual KES Conference. — 2012. — Р. 1–10. —  
Режим доступу до статті: [http://www.researchgate.net/publication/235902055\\_A\\_Complex\\_System\\_Approach\\_for\\_Smart\\_Grid\\_Analysis\\_and\\_Modeling](http://www.researchgate.net/publication/235902055_A_Complex_System_Approach_for_Smart_Grid_Analysis_and_Modeling)
4. Звіт про науково-дослідну роботу Інтелектуальні технології управління процесами гірничого виробництва в задачах енергозбереження та енергоефективності: Звіт про НДР (проміжний) / ДВНЗ “НГУ”; Керівн. В.В. Ткачов; № д.р. 0113U000402; Інв.№ 0214U003224. – Д., 2013. – 124 с.

**ABSTRACT**

**Purpose.** To develop the scientific approach to the creation of the mini smart-grids for small segments of electrical network based on the synchronization of working of electrical devices.

**The methods** of research are the methods of integer optimization and the methods of simulation of working of automatic control systems.

**Findings.** For the proposed algorithm of distribution of energy resources, the synchronization of work of heaters in time depends from general conditions of heating and occurs within 5-30 minutes. This means that the distribution of energy resources according to this algorithm is effective in the event, if the limit of total capacity, that allocated to heaters, and conditions of space heating will not vary during this time. The investigations of the proposed algorithm of distribution of energy resources with the synchronization of work of heaters in time, which are based on simulation of behaviors of smart-grid, showed that the algorithm provides the desired dynamic of heating, because the relative deviations of average temperatures of surfaces of the heaters do not exceed 2%. The level of use of a dedicated resource of energy is the 86.7% from maximal possible 100%.

**The originality** is the organization of distribution of energy resources among heaters with account of limit of general electrical power for individual small segment of electrical network, that is set by user. At the same time, the optimization of level of use of a dedicated resource of energy for the heaters is executed.

**Practical implications.** The results of investigations will be used for the creation of the low-cost mini smart-grids for small segments of electrical network.

**Keywords:** *smart-grids, synchronization in time, optimization of a dedicated resource of energy.*