

О.М. Заславський, канд. техн. наук, В.В.Ткачов, д-р техн. наук, професор, С.М.Проценко, І.А.Шедловський, К.В.Соснін, канд-ти техн. наук, В.І.Шевченко, О.В.Карпенко, (Україна, Дніпро, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКУ СИСТЕМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ОБІГРІВАЧАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ КОЛЕКТИВНОЇ ПОВЕДІНКИ ЗА УМОВИ РІЗНИХ СИТУАЦІЙ ПРИ ОБІГРІВІ

***Анотація.** Розглядається проблема практичної реалізації системи децентралізованого керування нагрівачами на основі теорії колективної поведінки, приведена розробка експериментального зразка системи, в якій формується система визначення пріоритетів нагрівачів і алгоритм функціонування смарткона відповідно до моделі децентралізованого управління. Розроблений стенд для експериментальної перевірки правильності функціонування системи управління. Результати експерименту показали працездатність розробленого алгоритму функціонування системи і системи формування пріоритетів, сумарна потужність нагрівачів, включених в електричну мережу, в різних ситуаціях не перевищувала заданих значень.*

***Ключові слова:** електричне опалення, колективна поведінка, децентралізоване управління.*

***Аннотация.** Рассматривается проблема практической реализации системы децентрализованного управления нагревателями на основе теории коллективного поведения, приведена разработка экспериментального образца системы, в которой формируется система определения приоритетов нагревателей и алгоритм функционирования смарткона в соответствии с моделью децентрализованного управления. Разработан стенд для экспериментальной проверки правильности функционирования системы управления. Результаты эксперимента показали работоспособность разработанного алгоритма функционирования системы и системы формирования приоритетов, суммарная мощность нагревателей включенных в электрическую сеть в различных ситуациях не превышала заданных значений.*

***Ключевые слова:** электрическое отопление, коллективное поведение, децентрализованное управление.*

***Abstract.** The problem of the practical implementation of a decentralized heater control system based on the collective behavior theory is considered, the development of an experimental model of the system in which a heater prioritization system and a smartcon functioning algorithm are developed in accordance with the decentralized control. Model is developed, a bench for experimental verification of the correctness of the control system is developed. Results the experiment showed the performance of p of the developed algorithm for the functioning of the system and the system of forming priorities, the total power of the heaters included in the electrical network in various situations did not exceed the specified values.*

***Keywords:** electric heating, collective behavior, decentralized control.*

Вступ. Концепція побудови децентралізованої інтелектуальної системи автоматичного розподілу енергії між електричними нагрівальними пристроями зводиться до наступних положень.

1. Підключення нагрівального пристрою до мережі електропостачання здійснюється не безпосередньо, а через «розумний» конектор-смарткон, який в конструктивному відношенні являє собою пристрій двостороннього роз'ємного з'єднання, що включається між розеткою мережі електроживлення і нагрівальним пристроєм.

2. Смарткони являються системо утворюючими елементами, які обмінюючись інформацією, наприклад, по силовій мережі електропостачання об'єкту, що контролюється, приймають рішення про підключення або відключення відповідних нагрівальних пристроїв, домагаючись, з одного боку, безумовного виконання обмеження потужності, яка може бути використана для опалення, а з інший – найбільш ефективного використання цієї потужності з урахуванням пріоритетів, що задаються при налаштуванні бажаного розподілу температур.

3. Регулювання температури нагрівального пристрою в зоні його розміщення здійснюється його власним термостатом. Смарткон лише підключає нагрівальний пристрій до мережі електропостачання.

4. Мережевий контролер в децентралізованій системі здійснює лише функції вимірювання сумарної споживаної об'єктом потужності, підсумовування запитів на ресурс електричної потужності, необхідної нагрівачам, а також підсумовування рангів пріоритетів нагрівачів, які в даній системі мають сенс плати за ресурс, пропонуваної кожним смартконом.

На підставі цих даних обчислюється середньозважена ціна ресурсу, яку мережевий контролер повідомляє усім смартконам. Необхідною (але не достатньою) умовою підключення нагрівача до мережі електроживлення є перевищення запропонованої смартконом плати за ресурс над вартістю цього ресурсу, обчисленою відповідно до середньозваженої ціни і необхідної кількості ресурсу (потужності). Остаточне рішення щодо підключення нагрівача до мережі електроживлення (або відключення від неї) смарткон приймає після перевірки додаткових умов, що гарантують виконання обмежень потужності і відсутність невикористаного ресурсу, що перевищує мінімальну потребу в ньому серед числа учасників розподілу. Якщо ж ці умови не відповідають попередньо прийнятим рішенням, смарткон повертається в число учасників розіграшу ресурсу. Ітераційна процедура розіграшу ресурсу повторюється до тих пір, доки всі смарткони не переведуть відповідні нагрівачі у стан «увімкнути» або «вимкнути».

Запропонована концепція спирається на теорію колективної поведінки автоматів, які взаємодіють з випадковим середовищем.

Постановка задачі. Постановку задачі розглянемо на прикладі.

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

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

За умови

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N r_j &\leq R && (r_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N); \\ \sum_{j=1}^N r_j &\leq R && (r_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, N). \end{aligned}$$

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 приватними похідними від функції Лагранжа, можна організувати децентралізовану поведінку в задачі про розподіл ресурсу, засновану на градієнтному методі:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr_j}{dt} &= k_1 \left(\frac{d\Psi_j(r_j)}{dr_j} - \lambda \right), \\ \frac{d\lambda}{dt} &= k_2 \left(\sum_{j=1}^N r_j - R \right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Класичне вирішення такої постановки задачі наводиться у роботах [1, 2]. Такий підхід еквівалентний тому, що кожен споживач ресурсу максимізує свою локальну функцію користі виду

$$s_j = \Psi_j(r_j) - \lambda r_j. \quad (3)$$

У 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 розподіляється між споживачами пропорційно їхнім запитам, тобто

$$r_j = \begin{cases} x_j & \text{при } \sum_{j=1}^N x_j \leq R, \\ \frac{Rx_j}{\sum_{j=1}^N x_j} & \text{при } \sum_{j=1}^N x_j > R, \end{cases} \quad (4)$$

де x_j – запит j -го споживача ресурсу.

Методика виконання роботи. Відмінною особливістю запропонованого підходу [3] 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

$$\psi_i(t) = \begin{cases} \psi_{i0}, & t = 0, \text{ if } \alpha_i = 1, \\ \psi_{i0} + K(t), & \text{if } \alpha_i = 0, \end{cases} \quad (5)$$

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. 1.

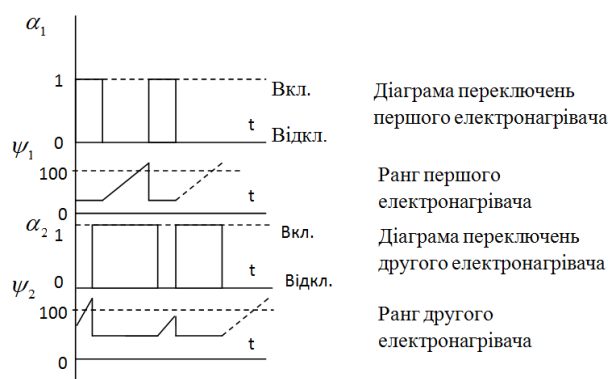


Рис. 1 Діаграми переключень та зміни рангів пріоритетів нагрівачів в інтелектуальній мережі опалювальних пристроїв

Основні результати. Для експериментальної перевірки запропонованих моделей були розроблені і виготовлені принципові схеми смарткона і мережевого контролера і розроблена функціональна схема експериментального стенду (рис. 2).

Мета проведення експерименту: перевірка роботи всіх вузлів експериментального зразка інтелектуальної мережі прямого електричного опалення в реальних умовах.

Ліміт потужності, що не повинна перевищуватись у мережі живлення задано на рівні 2,8 кВт.

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. Якщо підключене до смарткону обладнання не розпізнається як нагрівальний пристрій, цей смарткон не бере участь у розподілі потужності мережі живлення. Якщо підключене до смарткону обладнання розпізнається як нагрівальний пристрій, необхідно для цього смарткона знати величину потужності підключеного нагрівача, щоб

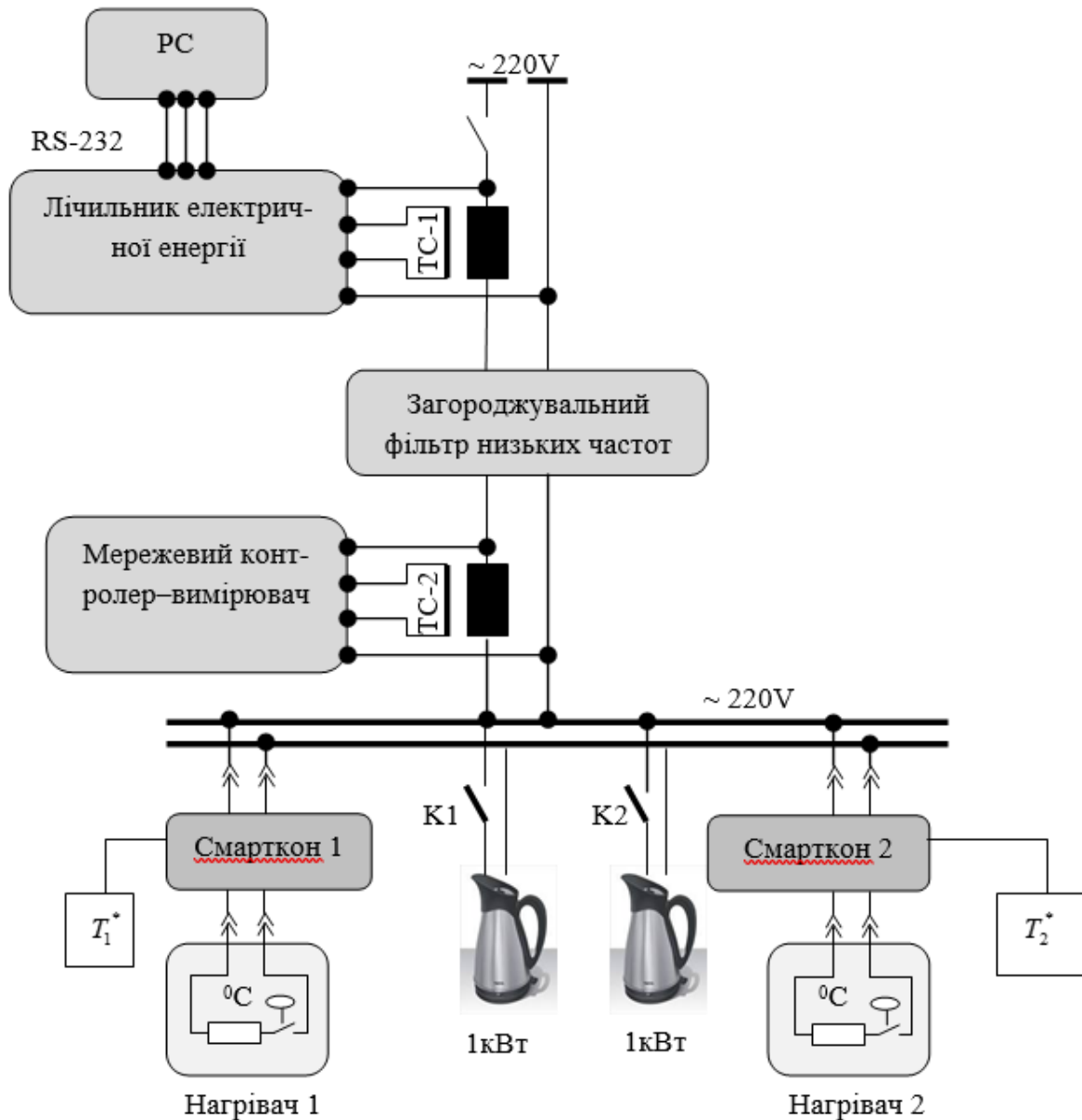


Рис. 2 Функціональна схема експериментального зразку інтелектуальної мережі прямого електричного опалення приміщень

брати участь у колективному розподілі потужності мережі живлення. Схема вузла розпізнавання навантаження показана на рис. 3.

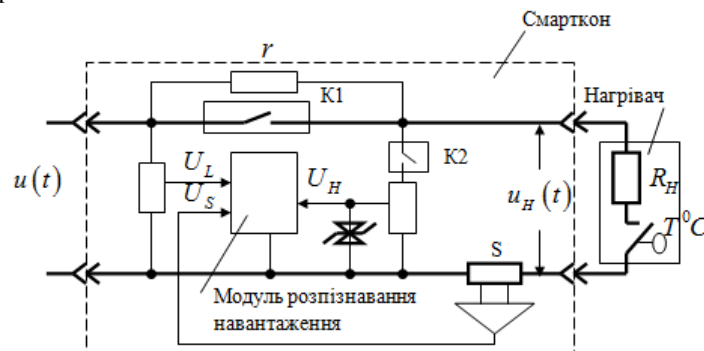


Рис. 3 Функціональна схема вузла розпізнавання навантаження

Силовий ключ К1 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 К1) була можливість розпізнати характер та величину навантаження смарткону. При розімкненому ключі К1 замикається ключ К2, 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 К1 на нагрівач подається напруга мережі живлення U . Потужність, яка споживається із мережі живлення дорівнює

$$P = \frac{U^2}{R_H}. \quad (6)$$

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

$$\tilde{P} = \left(\frac{U}{R_H + r} \right)^2 R_H \approx \frac{U^2}{r^2} R_H. \quad (7)$$

Висловивши з цього рівняння R_H та підставляючи одержане значення в (6), одержуємо

$$P = \frac{U^4}{r^2} \tilde{P}^{-1} = const \cdot \tilde{P}^{-1}. \quad (8)$$

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 $i_H(t)$

$$\tilde{P} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H(t) i_H(t) dt, \quad (9)$$

де T – інтервал усереднення потужності.

Для розпізнавання характеру навантаження вимірюється реактивна потужність

$$\tilde{Q} = \frac{1}{T} \int_0^T u_H \left(t - \frac{1}{4f} \right) \frac{u(t) - u_H(t)}{r} dt, \quad (10)$$

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. Ці співвідношення потребують експериментальної перевірки. Для вирішення задачі періодичного контролю за станом нагрівача, який може бути підключений до нагрівання, може бути в стані очікування нагрівання, або може бути відключений терморегулятором був розроблений алгоритм функціонування смарткона (рис. 4). Кожні три секунди на відмітку часу запускається задача виміру навантаження. Якщо нагрівач працює в режимі нагрівання, проводиться вимірювання потужності, що споживається нагрівачем. Якщо нагрівач знаходиться в очікуванні нагріву

то на 30 мілісекунд, він підключається до мережі, через 10 мілісекунд, а потім протягом 20 мілісекунд вимірюється потужність, яка споживана нагрівачем. Таким чином, в алгоритмі розподілу навантаження вводиться значення про стан та витрати нагрівачів.

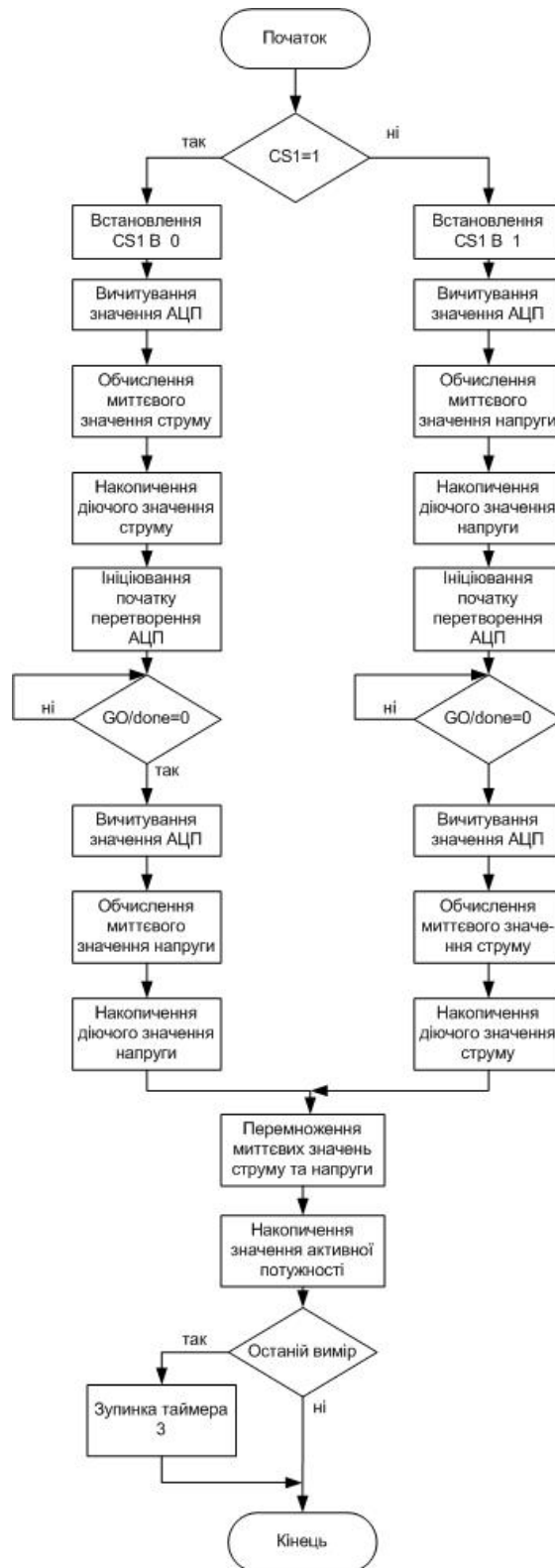


Рис. 4 Алгоритм функціонування смарткона

Контроль за ходом експерименту виконувався за допомогою персонального комп'ютера підключеного до мережевого контролера МК через перетворювач інтерфейсів USB/R232. Управління електронагрівальними пристроями здійснювалося смартконами 1 і 2. Електронагрівальні пристрої містять регулятори температури, які дозволяють споживачу задавати необхідну температуру. Температуру в приміщенні, смарткони додатково контролюють датчиками температури T1 і T2.

Вимірювання загальної потужності, яка споживається електричною мережею при роботі нагрівальних пристроїв здійснюється додатково інтелектуальним лічильником електричної енергії ЛО-3Т5-4М1.

Додаткові нагрівачі підключаються до силової мережі вимикачами K1 і K2.

Метою експерименту є перевірка працездатності системи децентралізованого керування нагрівальними пристроями, які обігрівають приміщення за заданими умовами.

Обмін інформацією між ВК і смартконами виконується через силову електромережу 220 В за допомогою протоколу Powerline. ВК являється ведучим пристроєм, він передає смартконам значення заданої температури в зоні регулювання, а також команду на включення, або відключення навантаження.

Був прийнятий наступний сценарій експерименту. Спочатку одночасно включалися нагрівачі Н1 і Н2, через заданий інтервал часу перемикачем K1 включалося додаткове навантаження. Ще через заданий інтервал перемикачем K2 включалося друге додаткове навантаження.

На рис. 5 наведено результати експериментальної перевірки алгоритму працездатності децентралізованої системи керування електричними нагрівальними пристроями. Згідно прийнятому сценарію експерименту в момент часу t_1 включалися нагрівачі Н1 і Н2, у момент часу t_2 було включене перше додаткове навантаження (K1), оскільки загальне навантаження на силову мережу перевищало задане значення, з невеликою затримкою відключився нагрівач Н2 (його температура T2 менше відрізнялася від заданого значення). У момент часу t_3 було включене друге додаткове навантаження. Згідно алгоритму функціонування смарткона через невелику затримку відключився нагрівач Н1. У момент часу t_4 було відключене перше додаткове навантаження. Після чого з невеликою затримкою включається нагрівач Н2, у якого більша різниця між заданою температурою і вимірюваною. У момент часу t_5 було відключене друге додаткове навантаження (K2), після чого через невелику затримку автоматично включився нагрівач Н1.

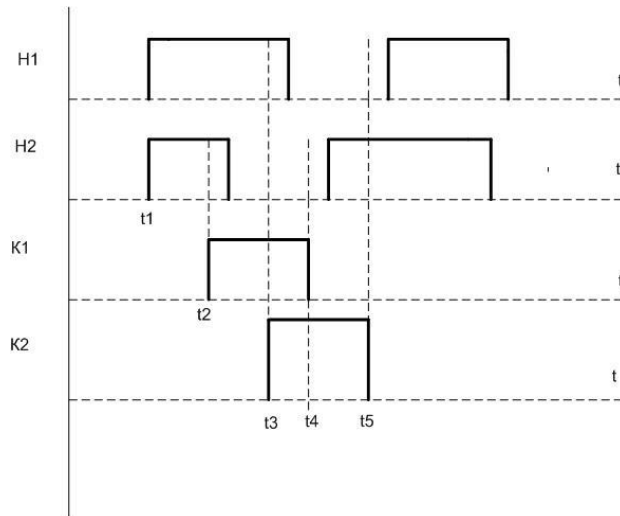


Рис. 5 Результати експериментальної перевірки роботи системи децентралізованого керування нагрівальними пристроями

Висновки. Результати експериментальної перевірки роботи системи фіксувалися у комп'ютерному протоколі випробувань і довели, що її поведінка в цілому, а також поведінка її складових частин – смартконів та контролера ВК відповідає вимогам до системи прямого електричного опалення, і сценарію експерименту. В процесі випробувань сумарна потужність електричної енергії, яка використовувалась, для опалення не перевищувала задані обмеження.

Список використаних джерел

1. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. М.: Наука, 1973 – 405 с.
2. Бурков В.Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977 – 256 с.
3. 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>.

4. 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. Одесский национальный политехнический университет, 2017, № 25 (101), С. 358–366.

5. 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.

УДК 621.311.019

В.В. Кузнецов, канд.техн. наук, Е.В. Кузнецова

(Украина, Днепр, Национальная металлургическая академия Украины)

А.В. Кузнецова, Д.В. Галушко

(Украина, Днепр, Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Аннотация. Статья посвящена анализу отрицательного влияния некачественной электроэнергии на эксплуатационные показатели электроустановок. Особое внимание уделено причинам ухудшения качества электрической энергии в системах электроснабжения промышленных предприятий, поскольку это приводит к снижению надежности и эффективности работы электропотребителей. Так же установлен различный характер режимов потребления и генерации реактивной мощности в линиях 27,5, 10 и 0,4 кВ. Выявлен разброс статистических характеристик показателей качества электроэнергии и значительные искажения кривых тока, что позволит более точно формировать методологию мероприятий по улучшению качества электрической энергии в сетях нетяговых потребителей.

Ключевые слова: качество электрической энергии, линии питания нетяговых потребителей, реактивная мощность, искажение тока, статистические характеристики.

Анотація. Стаття присвячена аналізу впливу неякісної електричної енергії на експлуатаційні показники електроустановок. Особливу увагу приділено причинам зниження якості електричної енергії в системах електропостачання промислових підприємств, оскільки це призведе до зниження надійності та ефективності роботи електроспоживачів. Встановлено характер режимів споживання та генерації реактивної потужності у лініях 27,5, 10 та 0,4 кВ. Виявлено широкий розкид статистичних характеристик показників якості електроенергії та значні спотворення кривих струму, що дозволить більш точно формувати методологію заходів з поліпшення якості електричної енергії у мережах нетягових споживачів.

Ключові слова: якість електричної енергії, лінії живлення нетягових споживачів, реактивна потужність, спотворення струму, статистичні характеристики.

Abstract. The article is devoted to the analysis of the negative impact of poor-quality electricity on the performance of electrical installations. Particular attention is paid to the reasons for the deterioration of the quality of electrical energy in the power supply systems of industrial enterprises, since this leads to a decrease in the reliability and efficiency of electrical consumers. It was found the different character modes of consumption and generation of reactive power in the lines 27.5, 10 and 0.4 kV. The wide variation in the statistical characteristics of power quality indicators and significant distortion curves current form will allow more accurate methodology measures to improve the quality of electricity networks of non-traction consumers.

Keywords: power quality, power lines of non-traction consumers, reactive power, current distortion, statistical characteristics.

Введение

Как известно [1], любая электромагнитная среда формируется как результат определенного технологического процесса. В электроэнергетическом процессе системы электроснабжения - это распределение, передача и потребление электрической энергии. Каждому этапу данного процесса свойственны определенные изменения, вызванные отклонениями от заданного режима, принципом действия электрооборудования и т.д. Показатели качества электрической энергии (ПКЭ) являются теми уровнями электромагнитной совместимости электрической сети, при которых гарантируется нормальное функционирование любых электротехнических средств, подключенных к сети, если эти ПКЭ не превышают допустимых значений.