

УДК 621.316, 696.6

А.В. ЛЕВШОВ (канд.техн.наук, доц.), А.В. КОРОТКОВ, И.С. ЗАБАРА

Государственное высшее учебное заведение

«Донецкий национальный технический университет»

[levshov@donntu.edu.ua](mailto:levshov@donntu.edu.ua)

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ И КОМФОРТОМ В МНОГОЗОНАЛЬНОМ ЗДАНИИ

*Рассмотрены особенности обеспечения требуемого комфорта в многозональных зданиях при использовании мультиагентной системы управления энергопотреблением и комфортом. Такая система управления охватывает все контролируемые зоны здания и в случае необходимости позволяет обеспечить максимально возможный общий комфорт в здании при снижении доступной электрической мощности.*

**Ключевые слова:** энергопотребление, комфорт, мультиагентная система управления, многозональное здание, оптимизация методом роя частиц, актуатор.

**Постановка проблемы.** Энергопотребление в секторе строительства и эксплуатации зданий достаточно велико. Так в США, на здания приходится более 40% национального потребления энергии, в Великобритании – 39%, в странах ЕС – 37% и в Китае – 25% [1]. В настоящее время во всем мире уделяется большое внимание проблемам сбережения и эффективного использования энергоресурсов зданиями. При этом следует помнить о влиянии микроклимата помещений на здоровье и самочувствие людей, поскольку в зданиях люди проводят большую часть своей жизни.

Проблема энергосбережения и обеспечения комфорта в зданиях может быть решена с помощью систем управления. Однако, в настоящее время, особенно в Украине, нет устоявшихся подходов и рекомендаций к разработке систем управления энергопотреблением и комфортом в зданиях. Наличие таких систем управления особенно актуально для зданий, которые получают питание от автономных возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) или от источников с ограниченной мощностью.

**Анализ предыдущих исследований и публикаций.** Частично указанная выше проблема может быть решена путем разделения здания на условные зоны и управления микроклиматом по зонам [1–3]. Каждое помещение может быть отдельной зоной, также возможно объединение нескольких помещений в одну зону, если они обладают сходными условиями. Иногда одно помещение может быть разделено на несколько зон, если условия окружающей среды в них не являются одинаковыми и должны устанавливаться независимо.

Комфорт в здании или его зонах обычно определяется сочетанием температуры, освещенности, концентрации CO<sub>2</sub> [2, 4, 5]. В некоторых случаях при оценке комфорта учитывают влажность, скорость движения воздуха и некоторые другие параметры [6]. Иногда вместо температуры воздуха используют прогнозируемую среднюю оценку по Фагнеру [6], которая показывает прогнозируемую чувствительность человека к тепловым условиям. Такая оценка зависит от параметров среды (температура воздуха, среднее тепловое излучение, скорость движения и влажность воздуха), физической активности человека и его одежды.

Однако, не смотря на серьезные усилия ученых и инженеров, до сих пор не сформировались единые подходы к разработке, реализации и анализу оптимальных систем управления зданиями [1]. Как правило, это обусловлено противоречивостью основных задач управления (снижение энергопотребления и обеспечение требуемого комфорта).

**Целью данной работы** является разработка системы управления комфортом в многозональном здании, способной обеспечить максимально возможный комфорт при снижении доступной электрической мощности.

**Материалы и результаты исследований.** В основу системы управления энергопотреблением и комфортом в здании может быть положена мультиагентная технология [1–5, 7, 8]. Такая технология позволяет разбить сложную задачу на простые подзадачи, которые могут быть решены при помощи агентов. В общем виде, проектирование мультиагентной системы управления может быть разбито на три этапа (рис. 1). Алгоритм работы каждого из агентов можно оптимизировать для повышения эффективности всей системы, например, исходя из минимума энергопотребления при поддержании комфортных условий в зданиях.

Предлагаемая система управления ориентирована на работу с определенными зонами здания и источниками электрической энергии. Она состоит из интеллектуальных агентов (локальные, зональные и центральный), источников электроснабжения (питающая сеть, ВИЭ) и актуаторов (исполнительных механизмов) в контролируемых зонах здания. Архитектура мультиагентной системы управления энергопотреблением и комфортом представлена на рис.2.

Центральный агент является одним из ключевых элементов в системе управления. Он осуществляет взаимодействие со всеми агентами на основе внешних данных (погодных условиях) и предпочтений пользователя о тепловом, визуальном комфорте и качестве воздуха, а также на основе данных об электрических нагрузках здания. Кроме того, центральный агент получает информацию от питающей сети и ВИЭ о доступной электрической мощности.

© Левшов А.В., Коротков А.В., Забара И.С., 2013



Рисунок 1 – Этапы проектирования мультиагентной системы управления

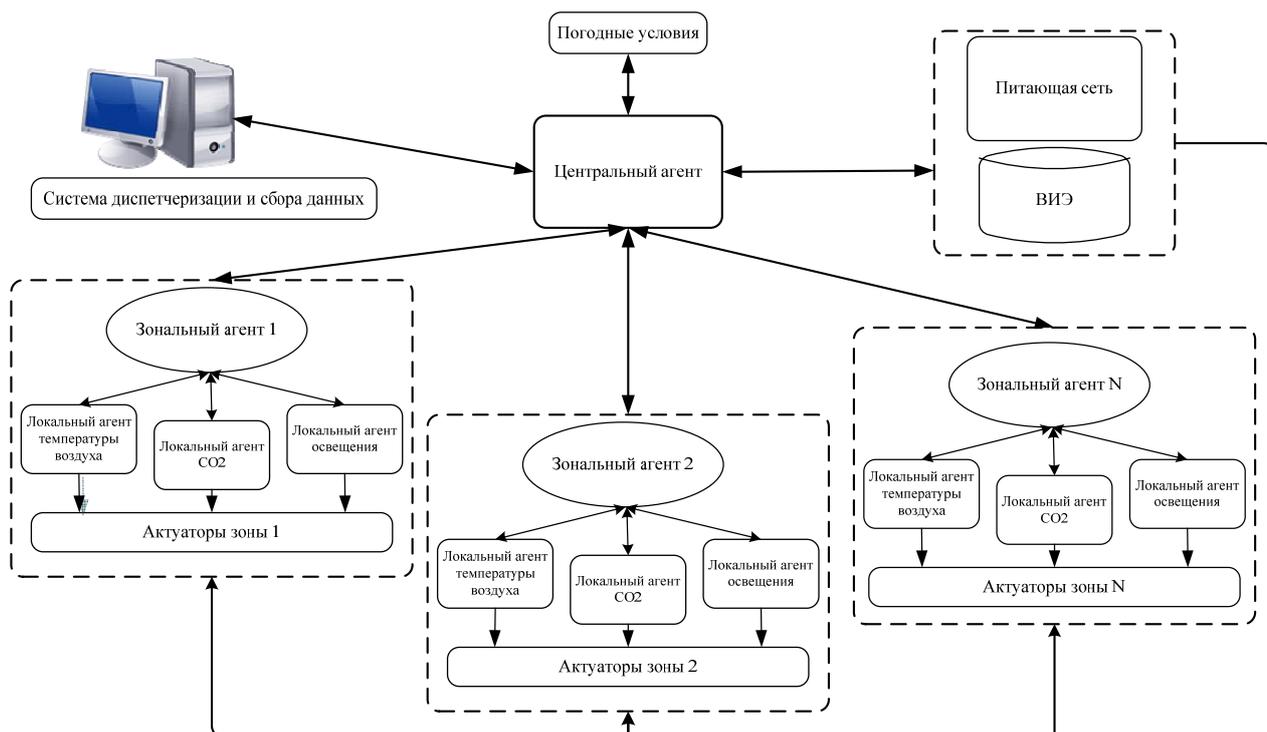


Рисунок 2 – Архитектура мультиагентной системы управления энергопотреблением и комфортом в здании

На основе указанной информации центральный агент осуществляет управление зональными агентами с целью распределения доступной мощности по зонам здания, при котором будет обеспечен максимальный комфорт. Зональные агенты свою очередь управляют работой локальных агентов, которые при помощи актуаторов доводят параметры комфорта до заданных.

Рассмотрим оценку комфорта в зданиях и в его зонах на основе индекса комфорта (*Comfort Index, CI*) [4] и общего комфорта (*Overall Comfort, OC*) [2]. Эти показатели могут изменяться в диапазоне от 0 до 1 и учитывать информацию о температуре, уровне освещенности и концентрации  $\text{CO}_2$  в зонах здания.

Индекс комфорта  $CI$  характеризует внутреннюю среду определенной зоны здания, и определяется по методике слияния информации о состоянии комфорта с помощью упорядоченного средневзвешенного агрегированных показателей комфорта. Математически индекс комфорта можно представить в виде:

$$CI = OWA(\mu_T, \mu_L, \mu_A) = \sum_{j=1}^3 \omega_j b_j, \quad (1)$$

где  $OWA$  – упорядоченное средневзвешенное (*Ordered Weighted Averaging*);  $\mu_T, \mu_L, \mu_A$  – агрегированные показатели комфорта по температуре, освещению и качеству воздуха соответственно;  $\omega_j$  – весовые коэффициенты соответствующих показателей комфорта,  $\omega_j \in [0, 1]$  и  $\sum_{j=1}^3 \omega_j = 1$ ,  $b_j$  – элементы вектора  $b$ , который является упорядоченным в порядке убывания вектором  $\mu = [\mu_T, \mu_L, \mu_A]$ .

Элементы вектора  $\mu$  рассчитываются как разница между абсолютным значением комфорта и ошибкой между реально измеренным значением и заданным:

$$\mu_N = 1 - \left| \frac{N - N_{set}}{N_{set}} \right|, N = T, L, A. \quad (2)$$

где  $T, L, A$  – реально измеренные значения параметров комфорта (температура, освещение и качество воздуха, соответственно).

Общий комфорт характеризует уровень комфорта для многозонального здания. С целью минимизации энергопотребления, можно задавать приоритет комфорта для каждой зоны, т.е. определить весовой коэффициент комфорта данной зоны в общем комфорте здания. Математически общий комфорт можно представить в виде:

$$OC = \sum_{i=1}^n \omega_i CI_i, \quad (3)$$

где  $n$  – число зон в здании;  $\omega_i$  – весовой коэффициент для  $i$ -й зоны,  $\omega_i \in [0,1]$  и  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ ;  $CI_i$  – индекс комфорта в  $i$ -й зоне, который обеспечивается зональными агентами.

Уравнения (1) – (3) можно считать моделью комфорта в здании.

Если нет ограничений по использованию электрической энергии из питающей сети, то доступная электрическая мощность будет больше, чем суммарная потребляемая мощность здания. В этом случае центральный агент распределяет требуемую мощность для каждой зоны и общий комфорт (1) будет максимальным и равным 1.

Если использовать источники питания с мощностью недостаточной для покрытия всех нужд здания, то общий комфорт в здании будет менее 1. В этом случае центральный агент должен решать оптимизационную задачу – по известной требуемой мощности, весовым коэффициентам зон и доступной мощности определяются значения мощности для каждой зоны, при которых будет максимально возможное значение общего комфорта. Оптимизация в этом случае проводится методом роя частиц [9].

Оптимизация методом роя частиц основана на использовании «интеллекта группы пчел», которые сообщают могут находить цель в определенном пространстве поиска. Поиск оптимального решения этим методом заключается в изменении положения и скорости частицы в направлении минимума целевой функции:

$$l^{k+1} = l^k + v^{k+1}, \quad (4)$$

$$v^{k+1} = \alpha v^k + c_1 rand_1 [pbest^k - l^k] + c_2 rand_2 [gbest^k - l^k], \quad (5)$$

где  $l^{k+1}$ ,  $l^k$  – позиции частицы на итерациях  $k+1$  и  $k$ , соответственно;  $v^{k+1}$ ,  $v^k$  – скорость частицы на итерациях  $k+1$  и  $k$ , соответственно;  $\alpha$  – коэффициент инерции;  $c_1$ ,  $c_2$  – коэффициенты, которые учитывают личное лучшее и глобальное лучшее, соответственно;  $rand_1$ ,  $rand_2$  – случайные числа в диапазоне от 0 до 1;  $pbest^k$ ,  $gbest^k$  – персональная и глобальная наилучшие позиции частицы на итерации  $k$ .

Обновление положений и скоростей частиц будет происходить до тех пор, пока не будет найдено решение и не завершится итерационный поиск (рис.3).

Работу предложенной системы управления (рис.2) и оптимизации методом роя частиц рассмотрим на примере четырехзонального здания (рис.4). Для каждой зоны известны (площадь, высота, весовой коэффициент или приоритет). Система вентиляции обеспечивает в каждой зоне трехкратный воздухообмен. В систему вентиляции поступает воздух с температурой  $T_{out} = 10^\circ\text{Ñ}$ . В приточных вентиляционных каналах каждой зоны установлены электрические нагреватели, которые поддерживают температуру в каждой зоне на уровне  $T_{in} = 22^\circ\text{Ñ}$ . Пренебрегаем тепловыми потерями в зонах и теплоступлениями, не связанными с электрическими нагревателями.

Общий комфорт в рассматриваемом здании может быть определен из (3) как:

$$OC = \sum_{i=1}^4 \omega_i CI_i = 0.4 \cdot CI_1 + 0.3 \cdot CI_2 + 0.2 \cdot CI_3 + 0.1 \cdot CI_4. \quad (6)$$

Затраты электрической энергии  $P_i$  на нагрев воздуха в  $i$ -й зоне здания можно определить по формуле

$$P_i = \frac{T_{in} - T_{out}}{\eta} GC_a, \quad (7)$$

где  $G$  – массовый расход воздуха;  $\eta$  – КПД электронагревателя;  $C_a$  – удельная теплоемкость воздуха.

При снижении доступной электрической мощности для здания будут снижаться индексы комфорта (1) в зонах и будет снижаться общий комфорт (6). В этом случае необходимо провести оптимизацию распределения мощностей по зонам здания.

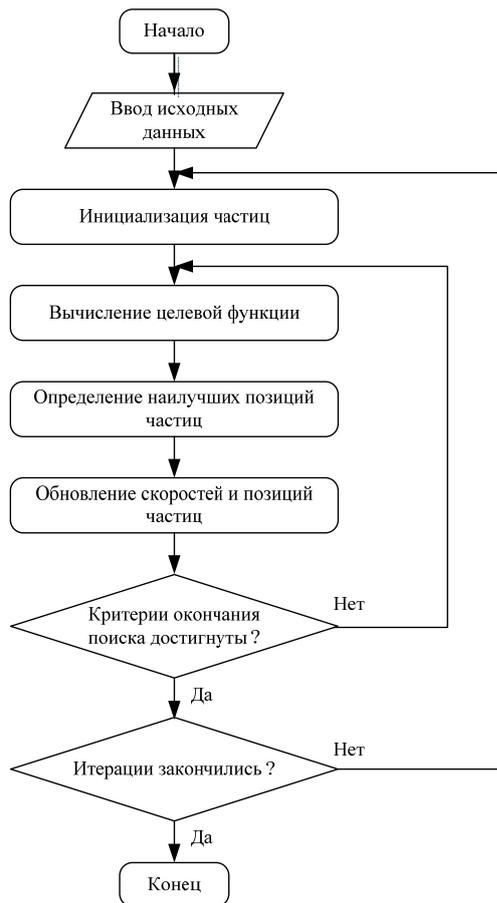


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма оптимизации методом роя частиц

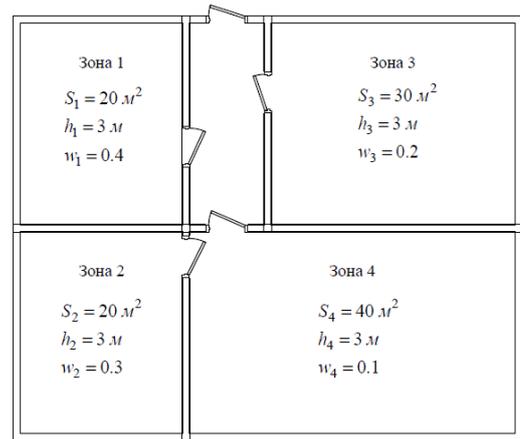


Рисунок 4 – План четырехзонального здания

При оптимизации в качестве частиц был выбран вектор мощностей, распределяемых в зоны здания. На этот вектор накладываются ограничения

$$\sum_{i=1}^4 P_i \leq P_{\Sigma} \tag{8}$$

Функция минимизации имеет вид

$$F = 1 - OC = 1 - \sum_{i=1}^4 \omega_i CI_i \tag{9}$$

При оптимизации учитываем только электрическую мощность, необходимую на нагрев воздуха.

Сравним результаты распределения мощности по зонам, температуры в зонах и общий комфорт в здании без оптимизации и с оптимизацией (табл. 1).

Таблица 1– Распределение электрической мощности по зонам здания при снижении доступной мощности

|  |                                   | $P_{\Sigma} / P_{\Sigma i}$ | 1.0             | 0.9    | 0.8    | 0.7    |        |
|--|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| Распределение мощности и общий комфорт по зонам здания | Без оптимизации                   | Зона 1<br>$w_1 = 0.4$       | $P_1 / P_{1н}$  | 1      | 0.9    | 0.8    | 0.7    |
|  |                                   |                             | $T_1, ^\circ C$ | 22     | 20.8   | 19.6   | 18.4   |
|  |                                   | Зона 2<br>$w_2 = 0.3$       | $P_2 / P_{2н}$  | 1      | 0.9    | 0.8    | 0.7    |
|  |                                   |                             | $T_2, ^\circ C$ | 22     | 20.8   | 19.6   | 18.4   |
|  |                                   | Зона 3<br>$w_3 = 0.2$       | $P_3 / P_{3н}$  | 1      | 0.9    | 0.8    | 0.7    |
|  |                                   |                             | $T_3, ^\circ C$ | 22     | 20.8   | 19.6   | 18.4   |
|  |                                   | Зона 4<br>$w_4 = 0.1$       | $P_4 / P_{4н}$  | 1      | 0.9    | 0.8    | 0.7    |
|  |                                   | $T_4, ^\circ C$             | 22              | 20.8   | 19.6   | 18.4   |        |
|  |                                   | Общий комфорт               |                 | 1      | 0.9455 | 0.8909 | 0.8364 |
|  | С оптимизацией методом роя частиц | Зона 1<br>$w_1 = 0.4$       | $P_1 / P_{1н}$  | 1      | 1      | 1      | 1      |
|  |                                   |                             | $T_1, ^\circ C$ | 22     | 22     | 22     | 22     |
|  |                                   | Зона 2<br>$w_2 = 0.3$       | $P_2 / P_{2н}$  | 1      | 1      | 1      | 1      |
|  |                                   |                             | $T_2, ^\circ C$ | 22     | 22     | 22     | 22     |
|  |                                   | Зона 3<br>$w_3 = 0.2$       | $P_3 / P_{3н}$  | 1      | 1      | 0.96   | 0.593  |
|  |                                   | $T_3, ^\circ C$             | 22              | 22     | 21.52  | 17.12  |        |
|  | Зона 4<br>$w_4 = 0.1$             | $P_4 / P_{4н}$              | 1               | 0.725  | 0.48   | 0.48   |        |
|  | $T_4, ^\circ C$                   | 22                          | 18.7            | 15.76  | 15.76  |        |        |
|  | Общий комфорт                     |                             | 1               | 0.9850 | 0.9673 | 0.9273 |        |

В табл.1 приняты следующие обозначения:  $P_{\Sigma}/P_{\Sigma i}$  – суммарная электрическая мощность, подведенная к зданию в долях номинальной суммарной мощности, необходимой для здания;  $P_i/P_{in}$  – электрическая мощность, подведенная к  $i$ -й зоне в долях номинальной мощности, необходимой для  $i$ -й зоны;  $T_i$  – температура в  $i$ -й зоне здания.

Как видно из табл.1, в условиях ограничения доступной мощности обеспечение критериев комфорта в зонах с более высоким приоритетом (зона 1 и зона 2) без использования предложенной системы управления обеспечить невозможно. Применение системы управления энергопотреблением и комфортом позволяет поддерживать требуемые значения температуры (и общий комфорт) даже при снижении величины доступной мощности до  $0.7P_{\Sigma}$ .

**Выводы.** Система управления энергопотреблением и комфортом должна охватывать все зоны здания и позволять провести оптимизацию распределения электрической энергии в случае уменьшения доступной электрической мощности. Каждой зоне здания должен быть установлен свой весовой коэффициент (приоритет), который учитывается при оптимизации энергопотребления. При управлении комфортом необходима модель комфорта, которая будет максимально отражать требуемые условия и предпочтения пользователя.

Оптимизацию распределения электрической энергии по зонам здания можно выполнить методом роя частиц. При оптимизации необходима модель преобразования электрической энергии в требуемые условия комфорта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klein L. Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems / Klein L., Kwak Jun-young, Jazizadeh F. [and colleagues] // Automation in Construction – 2012.– Volume 22, March 2012. – P. 525–536.
2. Yang R. Multi-zone building energy management using intelligent control and optimization / Yang R., Wang L. // Sustainable Cities and Society. – 2013. – Volume 6, February 2013. – P. 16 – 21
3. Mossolly M. Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm / Mossolly M., Ghali K., Ghaddar N. // Energy. – 2009. – № 34. – P. 58–66.
4. Wang Z. Multi-agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings / Wang Z., Wang L., Yang R. [and colleagues] // Applied Energy. – 2012. – Volume 99, November 2012. – P. 247 – 254.
5. Yang R. Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors / Yang R., Wang L. // Energy and Buildings. – 2013. – № 56. – P. 1 – 7.
6. Moderate Thermal Environment—Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, (ISO7730) International Organisation for Standardisation, 1994.
7. Yang R. Optimal Control Strategy for HVAC System in Building Energy Management // Yang R., Wang L. // Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). – 2012. – P. 1 – 8.
8. Qiao B. A Multi-Agent System for Building Control / Qiao B., Liu K., Guy C. // International Conference on Intelligent Agent Technology. – 2006. – P. 653-659.
9. Poli R. Particle swarm optimisation: an overview / Poli R., Kennedy J., Blackwell T. //Swarm Intelligence Journal: vol.1. – 2007. – P. 33-57.

#### REFERENCES

1. Klein L., Kwak J.-young, Jazizadeh F., Kavulya G., Becerik-Gerber B., Varakantham P., Tambe M. Coordinating occupant behavior for building energy and comfort management using multi-agent systems. Automation in Construction. 2012, 2: 525 – 536.
2. Yang R., Lingfeng W. Multi-zone building energy management using intelligent control and optimization. Sustainable Cities and Society: vol. 6. 2013: 16 – 21.
3. Mossolly M., Ghali K., Ghaddar K. Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm. Energy. 2009, 34: 58 – 66.
4. Wang Z., Wang L., Yang R., Dounis A. Multi-agent control system with information fusion based comfort model for smart buildings. Applied Energy: vol. 99. 2012: 247 - 254.
5. Yang R., Wang L. Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors. Energy and Buildings. 2013, 56: 1 – 7.
6. Moderate Thermal Environment—Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, (ISO7730) International Organisation for Standardisation, 1994.
7. Yang R., Wang L. Optimal Control Strategy for HVAC System in Building Energy Management. Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). 2012: 1 – 8
8. Qiao B. Liu K., Guy C. Multi-Agent System for Building Control. International Conference on Intelligent Agent Technology. 2006: 653 – 659.
9. Poli R., Kennedy J., Blackwell T. Particle swarm optimisation: an overview. Swarm Intelligence Journal: vol. 1.2007:33 – 57.

А.В. ЛЕВШОВ, А.В. КОРОТКОВ, І.С. ЗАБАРА

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»

**Система керування енергоспоживанням і комфортом у багатозональній будівлі.** Розглянуто особливості забезпечення необхідного комфорту в багатозональних будівлях при використанні мультиагентної системи керування енергоспоживанням і комфортом. Така система керування охоплює всі контрольовані зони будівлі і якщо буде потреба дозволяє забезпечити максимально можливий загальний комфорт у будівлі при зниженні доступної електричної потужності.

**Ключові слова:** енергоспоживання, комфорт, мультиагентна система керування, багатозональна будівля, оптимізація методом роя часток, актуатор.

A.V. LEVSHOV, A.V. KOROTKOV, I.S. ZABARA

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

**Control System of Power Consumption and Comfort in Multi-Zone Building.** In the article the multi-agent control system of power consumption and comfort in the multi-zone building is considered. Such control system covers all controlled zones of the building and in case of need makes it possible to provide maximum of overall comfort in the building at decrease in available electric power. Feature of a multi-agent control system consists in decomposition of a complex problem on simple tasks and the subsequent combination of partial solutions. Simple problems are solved by zone controller-agents, and combination of solutions is implemented by the central agent. The main indicators of comfort are index of comfort and overall comfort. The comfort index in a separate zone of the building takes into account the current temperature, illumination and quality of air according to its relevance (weight coefficients) for occupants. The overall comfort takes into accounts comfort indexes on building zones according to their priorities (weight coefficients). During decrease in available electric power it is necessary to execute optimization of power distribution in zones; it allowsto achieve the maximum possible overall comfort. It is offered to execute optimization by a method of a swarm of particles. It provides use of the formalized intelligence of a swarm of bees by search of a minimum of criterion function. By example of the four-zone building power consumption optimization at decrease in available electric power is executed. Calculations confirmed, using a multi-agent control system and optimization it is possible to provide maximum of overall comfort by the available electric power.

**Key words:** energy consumption, comfort, multi-agent control system, multi-zone building, optimization, actuator.