

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ ПОБУДОВИ БІСПЛАЙНА ЧЕТВЕРТОГО СТЕПЕНЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОЛІНОМА ЧЕТВЕРТОГО СТЕПЕНЯ

Розроблено спосіб побудови векторно-параметричного сплайна четвертого степеня (використовувався сегмент з трьох точок та двох перших похідних). Отримано векторно-параметричний сегмент на основі запропонованого полінома. Показана здатність такого сплайна утворювати бісплайн (векторно-параметричну поверхню) четвертого степеня. Розраховані порції поверхні. Приведено тестовий приклад векторно-параметричного сегмента та порції поверхні.

Ключові слова: сегмент з трьох точок та двох перших похідних, векторно-параметричний сплайн четвертого степеня.

Ковтун Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл, Одеська обл., Україна, e-mail: ikra55@list.ru.

Ковтун Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл, Одеська обл., Україна.

Kovtun Alexander, Danube Institute of National University «Odessa Maritime Academy», Izmail, Odessa Region, Ukraine, e-mail: ikra55@list.ru

УДК 519.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80561

Ерохін А. Л.,
Зацеркляний Г. А.

РОЗРОБКА ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТЕПЛОТРАТ У БУДІВЛІ НЕВИРОБНИЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Запропонована методика побудови розрахункової структури будь-якої конструктивно-функціональної схеми будівлі невиробничого призначення. Ця структура дозволяє розглядати з єдиних позицій будь-який взаємопов'язаний і взаємообумовлений тепловий процес. Показано, як в рамках об'єктно-орієнтованої методології Object Modeling Techniques побудувати функціональну і об'єктну моделі для аналізу тепловтрат у будівлі. Приведений приклад демонструє застосування одержаних результатів.

Ключові слова: розрахункова структура будинку невиробничого призначення, об'єктно-орієнтована модель, тепловтрати, теплоакumuлююча підлогова система електричного опалення.

1. Вступ

Житлово-громадський сектор економіки України відноситься до числа найбільших споживачів енергії. Основна частина енергії в будівлях споживається системами опалення, а також, при їх наявності, системами вентиляції і кондиціонування повітря. Сьогодні житлово-комунальна сфера України споживає до 50 % газу для обігріву будівель, виробництва гарячої води та приготування їжі. Важливим є те, що ефективність використання енергоресурсів в житловому фонді України в 3–5 разів нижча, ніж у країнах ЄС з подібними кліматичними умовами.

Витрати енергії на опалення значною мірою залежать від теплового захисту будівель. Україна значно поступається провідним країнам світу в теплоспоживанні будівель на 1 м² опалювальної площі. А це свідчить про великий потенціал енергозбереження в сфері теплопостачання, а отже низькому рівні енергоощадності будівель. Діапазон потенціалу енергозбереження в сучасних будівлях за деякими оцінками фахівців коливається від 10 до 50 %.

Питання енергозбереження актуальне не тільки для України. Тому на збільшення ефективності використання енергії в країнах ЄС спрямована директива Європейського парламенту та Ради 2010/31/ЄС від 19 травня 2010 року щодо енергетичної ефективності будівель. Дотримання вимог цієї директиви допоможе заощадити

до 1/5 споживаних енергоресурсів у країнах Європейського Союзу.

Завдання забезпечення в приміщеннях будівлі певного теплового режиму є організацією взаємодіючих та взаємопов'язаних теплових потоків у складній архітектурно-конструктивній системі з різноманітним складовим її елементами. Принциповою особливістю цієї системи є та обставина, що будівля як єдина енергетична система є не простою сумою цих елементів, а особливим їх з'єднанням, що надає всій системі нові якості, відсутні у кожного з елементів.

Таким чином, тепловий режим будівлі є складною системою. Для його аналізу, а тим паче для оптимізації, не обійтися без математичного моделювання з використанням інформаційних технологій.

Математичне моделювання (тобто проведення обчислювального експерименту) теплового режиму будівлі доцільно організувати в рамках пакету прикладних програм.

При розробці інформаційних систем та пакетів прикладних програм розробники намагаються задовольнити вимоги замовників за рахунок програмної реалізації компонентів системи, яка забезпечує виконання сервісів, необхідних користувачу. Такий підхід дозволяє значно розширити функціональність програмного продукту і знизити затрати як на його розробку, так і на виконання, а в разі необхідності, і на його модернізацію.

Це об'єктно-орієнтований підхід. Він використовується для розв'язування найрізноманітніших складних задач. До таких задач відноситься і задача аналізу та оптимізації тепловтрат у будівлях не виробничого призначення.

Тому за основу розробки прикладного забезпечення пакету прикладних програм для аналізу та оптимізації теплового режиму будівлі в даній роботі вибрано об'єктно-орієнтований аналіз. Результатами об'єктно-орієнтованого аналізу є моделі, що знаходяться в основі об'єктно-орієнтованого проектування, яке, в свою чергу, дозволяє розробити схему повної реалізації системи з використанням об'єктно-орієнтованого програмування.

Об'єктно-орієнтований аналіз дозволяє з єдиних позицій розглядати взаємопов'язаний і взаємообумовлений тепловий процес у будь-якій складній архітектурно-конструктивній структурі будівлі не виробничого призначення. А це дає широкі можливості для вибору раціональних параметрів теплозахисту при проектуванні нових і реконструкції існуючих будівель.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є взаємозв'язаний і взаємообумовлений тепловий процес у будь-якій складній архітектурно-конструктивній структурі будівлі не виробничого призначення. На сьогодні цей процес недостатньо вивчений. Експериментальне дослідження обмежене, адже ніхто не будував, не буде і не буде будувати дорогостоячі будинки заради вивчення його теплового процесу. Крім того, на сьогодні відсутні документовані програмні комплекси для теоретичного дослідження цього процесу. Разом із тим саме від цього процесу істотно залежать умови перебування людини в будинку і економія природних енергоресурсів.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка моделі аналізу і оптимізації тепловтрат у будівлі не виробничого призначення. Ця модель повинна з єдиних позицій розглядати взаємопов'язаний і взаємообумовлений тепловий процес у будь-якій конструктивній схемі будівлі.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі задачі:

1. Побудувати розрахункову структуру будівлі, в якій виділяються елементарні елементи, причому в кожному з них повинен спостерігатися один і той же визначаючий теплофізичний процес (конвекція, теплопровідність, променеве випромінювання).

2. В рамках об'єктно-орієнтованої методології ОМТ — Object Modeling Techniques, побудувати функціональну і об'єктну моделі аналізу тепловтрат у будівлі не виробничого призначення.

4. Аналіз літературних даних

На сьогодні моделюванню теплових процесів у будівлях із використанням інформаційних технологій приділяється велика увага в науковій літературі.

На сьогодні є зарубіжні комп'ютерні програми розрахунку теплоспоживання будівлі, серед них до найбільш популярних відносяться:

- DOE-2 (DOE-2.3), розроблена Lawrence Berkley National Laboratory, США [1];

- EnergyPlus (EnergyPlus 8.1.0), розроблена Lawrence Berkley National Laboratory, USA CERL, University of Illinois, США [2];

- BSim, розроблена Danish Building Research Institute, Данія [3];

- ESP-r, розроблена University of Strathclyde, Великобританія [4].

Як правило, ці програми спираються на національні нормативні документи і приховані математичні моделі, що лежать в основі їх розрахункових алгоритмів. А це ускладнює їх коректне застосування у будівельній практиці України.

Крім того, як показали дослідження [5–7], проведені з метою оцінки валідності зарубіжних комп'ютерних програм, результати розрахунку можуть значно відрізнятись в залежності від вибраної комп'ютерної програми.

В країнах СНД моделювання теплових режимів у будівлях знаходиться в зародковому стані. Проводяться дослідження або в окремих елементах будівлі, або за допомогою досить простих моделей. Так, підвищенню теплозахисту будівлі при розв'язуванні проблеми енергозбереження присвячені роботи [8–10]. Тут задача теплопровідності через оболонку будівлі проводиться в дво- і тривимірній постановці.

В роботах [11, 12] приділена увага розробці програмного комплексу, орієнтованого на чисельне розв'язування рівнянь Нав'є-Стокса для областей із довільною геометрією. Код має опції для вирішення завдань вільної і змішаної конвекції парогазової суміші з урахуванням поверхневої конденсації пари в присутності неконденсуючих газів. За допомогою цього коду в двовимірній і тривимірній постановках виконане чисельне моделювання ряду завдань із конвективного теплообміну в приміщенні будівлі.

Отже, відсутність програмних продуктів, які б розглядали взаємопов'язаний і взаємообумовлений тепловий процес у всій будівлі, обумовлюють необхідність проведення досліджень у цьому напрямку.

5. Матеріали та методи дослідження

В опалювальній будівлі невинно відбуваються складні процеси теплообміну [13]. У передачі тепла беруть участь порізно чи в поєднаннях три види теплообміну [14]:

- теплопровідність;
- конвекція;
- теплове випромінювання.

Жила будівля складається з під'їздів, які не завжди є однаковими. Під'їзди складаються з поверхів, частини підвалу, частини горища, частини даху і сходів. Поверхи містять квартири і частину сходів. На першому і останньому поверхах частини сходів відрізняються від цих частин на інших поверхах. Квартири складаються з декількох кімнат різного призначення. Отже, жилу будівлю можна подати у вигляді дерева (рис. 1), найнижчим рівнем якої є елементарний елемент (складові огорожувальної конструкції і скінчені частини пароповітряної суміші: кімната, частина сходів, частина горища, частина підвалу). Деякі елементи в конкретному будинку можуть бути відсутніми.

Така структура дозволяє розглядати з єдиних позицій будь-який будинок, а взаємопов'язаний і взаємообумовлений тепловий режим у всьому будинку зводить до теплового режиму в елементарних елементах, узгоджуючи їх відповідними крайовими умовами.

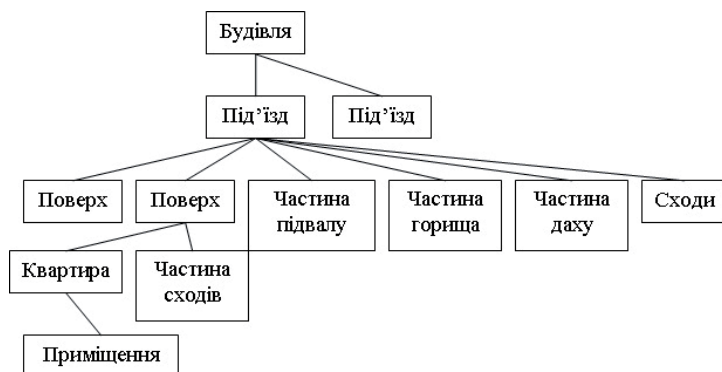


Рис. 1. Структура жилої будівлі

Подібну структуру можна побудувати для будь-якого жилого, громадського чи адміністративного будинку.

На сьогодні існує декілька технологій об'єктно-орієнтованої розробки прикладних програмних систем, в основі яких знаходиться побудова та інтерпретація на комп'ютері моделей цих систем. У даній роботі використовується методологія ОМТ (Object Modeling Techniques) [15].

У технології ОМТ проектована програмна система моделюється трьома взаємопов'язаними моделями:

- функціональної моделі, в якій подається взаємодія окремих частин системи (як за даними, так і за управлінням) у процесі її роботи;
- об'єктної моделі, яка подає статичні, структурні аспекти системи, в основному пов'язані з даними;
- динамічної моделі, яка описує роботу окремих частин системи.

Аби визначити тепловтрати через огорожувальні конструкції, потрібно знати температури на зовнішній поверхні елемента, який подає відповідну огорожувальну конструкцію, і температуру оточуючого середовища. Оточуючим середовищем є сусідні елементи або середовище, з яким стикаються зовнішні стіни. Температура на зовні є сталою, або змінюється за певним законом, який визначається експериментально. Температура у сусідньому елементі визначається в рамках прийнятої моделі за певною методикою.

Температура на зовнішній поверхні огороження визначається шляхом розв'язування задачі теплопровідності через огорожувальну конструкцію, як правило, багат шарову.

Температура на внутрішній поверхні визначається шляхом розв'язування задачі про конвективний теплообмін. Перед розв'язуванням цієї задачі потрібно розв'язати задачу про надходження тепла за рахунок променевого випромінювання, якщо таке спостерігається. Надходження тепла як за рахунок променевого випромінювання, так і за рахунок конвекції, подається внутрішніми (об'ємними, поверхневими, точковими) джерелами тепла.

Таким чином, реалізація функціональної моделі аналізу тепловтрат у рамках об'єктно-орієнтованого проектування у будівлі не виробничого призначення зводиться до таких кроків:

1. Визначення теплонадходження за рахунок променевого випромінювання і конвекції. Передача результатів у блок для розв'язування задачі про конвективний теплообмін.

2. Розв'язування задачі про конвективний теплообмін. Передача результатів у блок для розв'язування задачі про тепловтрати за рахунок теплопровідності через елементи, які подають огорожувальну конструкцію.

3. Визначення тепловтрат через огорожувальну конструкцію.

У технології ОМТ динамічна модель проєктованого програмного продукту описує роботу окремих частин цієї системи. В нашому випадку — це окремі модулі, які подають методи аналізу теплопровідності, конвективного теплообміну і променевого випромінювання. Вказані методи докладно описані в роботах [16, 17]. Вони потребують деяких експериментальних даних (кількість шарів в елементі багат шарової огорожувальної конструкції, коефіцієнти теплопровідності і тепловіддачі кожного шару, тип опалювального приладу, площу поверхні нагріву приладу, температури теплоносія на вході і виході із опалювального приладу, тип лампи освітлення, кут нахилу скління до горизонтальної площини, висота і ширина світлових прорізів, ширина горизонтальних і вертикальних будівельних сонцезахисних площин тощо). Потрібні експериментальні дані оформлені у вигляді спеціальних таблиць і є невід'ємною частиною програмного продукту, побудованого на основі об'єктно-орієнтованої моделі, яка пропонується в даній роботі.

Розглянемо побудову об'єктної моделі теплового процесу в будинку не виробничого призначення на основі об'єктно-орієнтованого підходу. В загальному випадку модель системи складається з таких елементів:

1. Зовнішнє середовище (ЗС).
2. Елемент огорожувальної конструкції (ОК).
3. Пароповітряний простір (ПП).
4. Система опалення (СОП).
5. Система освітлення (СОС).
6. Сонячна радіація (СР).
7. Люди (Л).

Приймається така методологія моделювання. Елементарні елементи системи типізовані, тобто кожний елементарний елемент системи належить певному виду.

Стан елементарного елемента системи визначається внутрішніми процесами, відображеними в субмоделі, і впливами на нього інших елементарних елементів системи. Стан елементарного елемента системи описується набором *змінних* його стану.

Кожний елементарний елемент системи одержує інформацію (*параметри*) про стан тих елементарних елементів системи, які мають на нього вплив. Узагальнена інформація про наявність такого впливу для кожного елементарного елемента системи подається матрицею міжелементарних впливів. Імена рядків і стовпчиків у цій матриці відповідають іменам елементарних елементів системи, перерахованих вище. Значення елемента матриці, що дорівнює 1, розміщене у рядковій з іменем i і у стовпчиків з іменем k , означає, що елементарний елемент з іменем i зазнає впливу з боку елементарного елемента системи з іменем k , а якщо цей елемент дорівнює 0, то такого впливу немає. Ця матриця використовується для побудови інтерфейсів функцій, які описують поведінку елементарних елементів системи.

Моделювання поведінки системи виконується на певному відрізку часу. Часовий крок моделювання

є змінним. При цьому виконання кожного кроку включає в себе 3 етапи:

1. Кожний елементарний елемент системи одержує інформацію про стан елементарних елементів, які впливають на нього в даний момент часу.

2. Кожний елементарний елемент системи обчислює свій стан в наступний момент часу з урахуванням величини поточного кроку моделювання (не переходячи при цьому в наступний стан). Обчислення виконуються на основі відповідної субмоделі елементарного елемента системи.

3. Кожний елементарний елемент системи реалізує (переводить себе в) наступний стан.

Відповідно до ідеології об'єктно-орієнтованого моделювання всі елементарні елементи моделі системи типізовані, тобто відносяться до певного класу і кожний елемент моделі системи подається об'єктом відповідного класу. При цьому структура, властивості і поведінка об'єкта даного класу однозначно визначається описом цього класу. Клас визначає інформаційну структуру елемента моделі системи і містить набір функцій (методів), що визначають еволюцію його стану. При цьому структура міжелементних взаємодій, що визначається матрицею міжелементних впливів, подається у відповідних класах у вигляді списків аргументів функцій — членів класу, які здійснюють виконання другого етапу чергового кроку моделювання системи.

Приведемо опис кожного класу даної моделі.

1. Зовнішнє середовище. У цьому класі параметрами є:

- його температура, яка може бути сталою, або змінюватися за певним законом, встановленим експериментально;

- температура зовнішньої поверхні елемента огорожувальної конструкції;

- кількість шарів в елементі огорожувальної конструкції;

- товщини і коефіцієнти теплопровідності кожного шару елемента огорожувальної конструкції.

Змінною (вихідною величиною) є кількість тепла, яка надходить у зовнішнє середовище. Операцією цього класу є визначення тепловтрат через елемент огородження приміщення. Тепловтрати розраховуються за формулою:

$$Q = \alpha \Delta T,$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі зовнішньої поверхні елемента огорожувальної конструкції; ΔT — перепад температури між зовнішньою поверхнею елемента огорожувальної конструкції і температурою зовнішнього середовища.

Коефіцієнт тепловіддачі розраховується за формулою:

$$\alpha = \frac{1}{R},$$

де $R = R_p + R_{se} + R_{si}$.

Для багат шарових стін показник опору R_p є сумою таких показників для кожного окремого шару:

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Показники на внутрішньому R_{si} і зовнішньому R_{se} шарах стіни такі:

$$R_{si} = 0,13,$$

$$R_{se} = 0,04.$$

Коефіцієнти теплового опору обчислюються для кожного шару окремо за такою формулою:

$$R_i = \frac{D_i}{\lambda_i},$$

де D_i — товщина шару; λ_i — коефіцієнт теплопровідності.

2. Пароповітряний простір. Сюди відносяться внутрішні простори приміщення будь-якого призначення, частини сходів, частини горища, частини підвалу. У цьому класі параметрами є:

- геометричні розміри пароповітряного простору (довжина, ширина, висота);

- координати розміщення (вказуються від лівого верхнього кута за часовою стрілкою) та тип внутрішніх і зовнішніх точкових, об'ємних і поверхневих джерел і стоків тепла (координати вказуються відносно лівого верхнього кута пароповітряного простору), які моделюють надходження тепла від систем опалення і освітлення, сонячного випромінювання і людей.

Змінними цього класу є розподіл температури, щільності, компонент вектора швидкості в пароповітряному просторі. Операцією цього класу є визначення розподілу температури (в тому числі на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції), щільності, компонент вектора швидкості в пароповітряному просторі. Методом реалізації цієї операції є вдосконалений метод скінчених об'ємів, який розглядає конвективний процес у наближенні тривимірного нестационарного турбулентного потоку пароповітряної суміші. В залежності від характеру зв'язку із сусідніми елементарними елементами можуть задаватися різні крайові умови (на вході і виході, на твердій стінці, крайові умови симетрії, періодичні граничні умови), які мають характерну реалізацію в обчислювальній схемі. Тому даний клас має відповідні підкласи. Крім того, є підклас, методом операції якого є реалізація квазістационарної моделі. Вказані методи і відповідні крайові умови описані в роботі [16].

3. Елемент огорожувальної конструкції. Сюди відносяться зовнішні і внутрішні стіни (як правило, багат шарові), перекриття (між поверхами, між першим поверхом і підвалом, між останнім поверхом і горищем), перегородки (між приміщеннями), вікна (різного типу, як правило, багат шарові), двері (вхідні (часто багат шарові), міжкімнатні). У цьому класі параметрами є:

- кількість шарів;

- матеріал, із якого виготовлений відповідний шар;

- товщина і коефіцієнт теплопровідності кожного шару;

- координати розміщення та тип внутрішніх і зовнішніх точкових, об'ємних і поверхневих джерел і стоків тепла (координати вказуються відносно лівого верхнього кута елементарного елемента).

Змінною (вихідним параметром) є температура на зовнішній поверхні елемента огородження. Операцією цього класу є визначення температури на зовнішній поверхні елемента огородження. Методом реалізації цієї операції є модифікований метод скінчених елементів, який розглядає тепловий процес у наближенні тривимірного нестационарного теплового потоку. Модифікація методу дозволяє проводити неперервні обчислення, незважаючи на наявність тонких шарів з різними теплофізичними властивостями. Окремим випадком

цього методу є одновимірний нестационарний процес. В залежності від характеру зв'язку із сусідніми елементарними елементами можуть задаватися різні крайові умови (першого, другого, третього і четвертого роду), які мають характерну реалізацію в обчислювальній схемі. В зв'язку з цим даний клас має ряд підкласів. Вказані методи описані в роботі [17].

4. Система опалення. Сюди відносяться традиційні системи опалення, теплі підлоги і випромінюючі панелі, охолоджуючі стелі і «балки» як із рідинним (в основному вода) чи повітряним теплоносієм, так і електричні системи опалення. Параметрами цього класу є:

- тип опалювального приладу;
- площа поверхні нагріву приладу;
- температури теплоносія на вході і виході із опалювального приладу і повітря всередині приміщення.

Змінними цього класу є кількість тепла, яка поступає від системи опалення як у результаті конвективного теплообміну, так і в разі променевого випромінювання [18]. Операцією цього класу є визначення кількості тепла, що поступає від системи опалення. Кількість тепла, що надходить у результаті конвективного теплообміну, знаходиться за формулою:

$$Q_{o\max}^p = K_p F_p \left(\frac{t_1 + t_2}{2} - t_i \right),$$

де $Q_{o\max}^p$ – тепловий потік від опалювального пристрою; K_p – коефіцієнт теплопередачі опалювального приладу; F_p – площа поверхні нагріву приладу; t_1, t_2, t_i – відповідно температури теплоносія на вході і виході із опалювального приладу і повітря всередині приміщення.

В разі променевого теплообміну між двома тілами в замкненому просторі розрахункова формула для кількості теплоти, одержаної тілом із площею F_2 і температурою T_2 в результаті променевого випромінювання, має вигляд:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_n C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де $\varepsilon_n = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right)^{-1}$; F_1 і T_1 – площа і температура

більш нагрітого тіла; F_2 і T_2 – площа і температура менш нагрітого тіла; $C_0 = 5,7$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ε_1 і ε_2 – міра чорноти відповідно більш і менш нагрітого тіла.

5. Система освітлення. Сюди відносяться лампи розжарювання, відкриті та закриті люмінесцентні лампи із холодним катодом та з гарячим катодом. Параметрами цього класу є тип лампи освітлення, температура і швидкість руху навколишнього повітря. Змінною є кількість тепла, що виділяється в приміщення від системи освітлення. Операцією цього класу є визначення кількості тепла, що виділяється в приміщення від системи освітлення. Ця величина знаходиться для люмінесцентних ламп шляхом множення норм освітленості приміщень, наведених у внутрішній спеціальній таблиці, на питоме виділення тепла, наведені в іншій внутрішній спеціальній таблиці побудованого програмного продукту, з введенням поправочного коефіцієнта 2,75, якщо освітлення проводиться лампами розжарювання.

6. Сонячна радіація. Клас моделює надходження тепла в приміщення від сонячної радіації через засклені світлові прорізи та масивні огорожувальні конструкції. Параметрами класу є:

- число світлових прорізів і масивних огорож;
- площа світлового прорізу (скління), кут нахилу скління до горизонтальної площини, висота і ширина світлового прорізу, ширина горизонтальних та вертикальних будівельних сонцезахисних площин, внутрішні поверхні огорожень приміщення і поверхні обладнання (меблі): координати, маса обладнання (меблів), температура повітря в приміщенні, площа масивної огорожі (зовнішньої стіни, покриття).

Змінною цього класу є кількість теплоти, що надходить у приміщення від сонячної радіації через засклені світлові прорізи і масивні огорожувальні конструкції будівель. Операцією цього класу є визначення кількості тепла, що надходить у приміщення від сонячної радіації. Метод знаходження цієї кількості теплоти взятий у роботі [19].

7. Люди. Клас моделює тепловиділення від людей у жилих і громадських будівлях та адміністративно-побутових приміщеннях промислових підприємств. Параметрами класу є кількість людей, що знаходяться в приміщенні, температура в приміщенні, місцезнаходження (координати відносно лівого верхнього кута елементарного елемента, що моделює відповідний пароповітряний простір), і фізичне навантаження на людину (спокій, легке чи важке навантаження). Змінною цього класу є кількість теплоти, що надходить у пароповітряний простір від людей, які в ньому заходяться. Операцією даного класу є визначення кількості теплоти, що надходить у пароповітряний простір. При цьому використовуються дані внутрішньої спеціальної таблиці.

6. Результати дослідження

Розглянемо побудову об'єктної моделі теплового процесу на конкретному прикладі застосування теплоакмулюючого електроопалення [20–22]. Перспективність застосування такого опалення пов'язана з його високою енергоефективністю, що ґрунтується на використанні «надлишків» нічної електроенергії.

Теплоакмулююча підлогова система електричного опалення жилих та громадських будівель є однією з енергоефективних систем опалення, широко застосовуваних у світовій енергетичній практиці. Частка електроопалення будівель у ряді розвинених країн світу складає, в середньому, 30 ... 40 %, а у Франції, Норвегії досягає 80 % [23]. Крім того, перспективність застосування підлогового опалення в жилих і громадських будівлях пов'язана з тим, що при підлоговому опаленні створюються більш комфортні теплові умови для людини.

Типова електропідлога [23], рис. 2, складається із 2-х ярусів.

Нижнім ярусом є три ізольовані низькотемпературні кабелі (максимальна робоча температура зовнішньої оболонки +65 °С), рівномірно з кроком 6 см покладених на панель міжповерхового перекриття і покритих шаром важкого бетону 90 мм (теплопровідність 1,2...1,5 Вт/м·°С, в середньому – 1,4 Вт/м·°С, теплоємність знаходиться в межах 0,75...0,92 Дж/кг·К; у середньому – 0,84 Дж/кг·К. Аби тепло, яке виділяється в електрокабелі, поширювалося в приміщення, що обігрівається, під кабелі укла-

дається шар високоефективного теплоізолятора стиродур і відображаючий екран із фольгоізола. У верхньому ярусі покладений такий же за потужністю один кабель комфортного опалення в 20 мм від поверхні підлоги.

Аби тепло, яке виділяється в електрокабелі, поширювалося в приміщення, що обігрівається, під кабелі укладається шар високоефективного теплоізолятора стиродур і відображаючий екран із фольгоізола; у верхньому ярусі покладений такий же за потужністю один кабель комфортного опалення в 20 мм від поверхні підлоги.

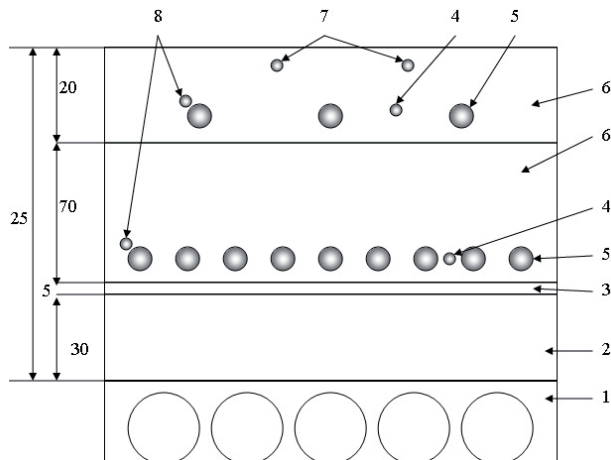


Рис. 2. Схема електропідлоги: 1 — плита міжповерхового перекриття; 2 — теплоізоляція; 3 — відображаюча ізоляція; 4 — датчик температури бетонного шару; 5 — опалювальні кабелі; 6 — теплоакмулюючий шар; 7, 8 — датчики температури поверхні бетонного шару і кабелю

Розглядається кутова кімната (рис. 3). Розміри кімнати — $4,8 \times 3,03 \times 2,75$ м. Термічний опір теплопередачі зовнішніх стін відповідає значенню $2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Термічний опір теплопередачі вікна складає $0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Електроенергія в підлогу подається з 23 години вечора до 7 години ранку [23].

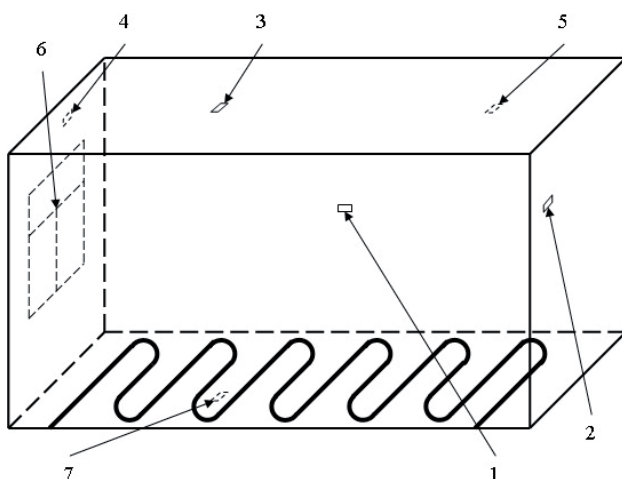


Рис. 3. Схема приміщення: 1, 2 — внутрішні стіни; 3 — стеля; 4 — зовнішня фасадна стіна; 5 — зовнішня торцева глуха стіна; 6 — вікно; 7 — електропідлога

Виділимо спочатку елементи огорожувальної конструкції (ОК). Зовнішню фасадну стіну 4 подамо у вигляді п'яти елементарних елементів (рис. 4): чотири

елементи — це частини стіни (ОК₁, ОК₂, ОК₃, ОК₄), а п'ятий елемент — вікно (ОК₅).

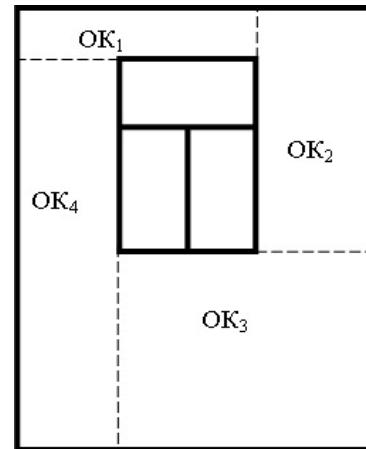


Рис. 4. Елементарні елементи зовнішньої фасадної стіни 4

Оскільки для зовнішніх стін і вікна із роботи [23] відомий термічний опір теплопередачі, то в даній роботі ці елементи подаються одношаровими з коефіцієнтами теплопровідності, які знаходяться за формулою:

$$\lambda_i = \frac{D_i}{R_i},$$

де D_i — товщина шару; R_i — заданий термічний опір. Товщина елемента (і стін, і вікна) вибрана рівною 250 мм.

Відносно внутрішніх стін і стелі із роботи [23] нічого невідомо, тому ці частини огорожувальної конструкції в даній роботі подаються непроникними елементами і для тепла, і для пароповітряної суміші, а зовнішня торцева глуха стіна подаються одношаровим елементарним елементом (ОК₆).

Електропідлога — двошаровий елемент огорожувальної конструкції, в основі якого знаходиться теплоакмулюючий шар: важкий бетон товщиною 70 мм із теплопровідністю $1,4 \text{ Вт}/\text{м} \cdot ^\circ\text{С}$ і теплоємністю $0,84 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$, другим шаром є теж теплоакмулюючий шар товщиною 20 мм із того ж важкого бетону. Тому електропідлога подається двома елементарними елементами (ОК₇) — нижній шар, ОК₈ — верхній шар).

Розрахунок теплового режиму в усіх восьми елементах, які імітують зовнішні стіни, вікно і підлогу, проводиться в наближенні тривимірного нестационарного теплового потоку з граничною умовою четвертого роду [17]. Звідси впливає вибір підкласу з відповідним об'єктом.

В об'єктній моделі теплового процесу розглядуваної частини будівлі є елементарний елемент, який імітує пароповітряний простір приміщення (ПП). Його геометричні параметри збігаються з відповідними параметрами розглядуваного приміщення. Надходження тепла від системи опалення імітується поверхневим джерелом тепла (СОП₀). Конвективний теплообмін у даному елементарному елементі розглядається в наближенні тривимірного нестационарного руху пароповітряної суміші з граничними умовами на твердій непроникній стінці [16].

Система електроопалення подається двома елементарними елементами (СОП): перший — це три ізольовані

низькотемпературні кабелі, рівномірно з кроком 6 см покладених на панель міжповерхового перекриття (СОП₁) і другий — це один кабель такої ж потужності у верхньому ярусі (СОП₂). Елементарні елементи в моделі подаються нагрітими (до +65 °С) площинами нульової товщини.

Ще одним елементарним елементом є зовнішнє середовище (ЗС). Температура зовнішнього середовища вважається рівною -15 °С.

Матриця міжелементних впливів для розглядуваного прикладу така (табл. 1).

Таблиця 1

Матриця міжелементних впливів

Елементи	ЗС	ОК ₁	ОК ₂	ОК ₃	ОК ₄	ОК ₅	ОК ₆	ОК ₇	ОК ₈	ПП	СОП ₀	СОП ₁	СОП ₂
ЗС	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
ОК ₁	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
ОК ₂	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
ОК ₃	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
ОК ₄	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
ОК ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ОК ₆	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
ОК ₇	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ОК ₈	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
ПП	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
СОП ₀	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
СОП ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
СОП ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Конвективний теплообмін в елементарному елементі ПП розглядається в наближенні нестационарного тривимірного турбулентного потоку пароповітряної суміші, а для його реалізації використовувався метод скінчених об'ємів. В елементарних елементах ОК₁–ОК₈ тепловий процес моделюється нестационарним тривимірним потоком тепла через тверді стінки, а за метод реалізації використовується метод скінчених елементів. Надходження тепла в елементарні елементи ОК₇, ОК₈ і ПП подається поверхневими нестационарними джерелами тепла, інтенсивності яких визначаються за формулами:

— для конвективної складової:

$$q_{o\max}^p = K_p(t_1 - t_i),$$

де K_p — коефіцієнт теплопередачі опалювального приладу; t_1 , t_i — відповідно температури електрокабелю і повітря всередині приміщення;

— для променевої складової:

$$q_{1-2} = \epsilon_n C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де $\epsilon_n = \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1}$; T_1 і T_2 — температури більш нагрітого тіла і менш нагрітого; $C_0 = 5,7$ — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ϵ_1 і ϵ_2 — міра чорноти відповідно більш і менш нагрітого тіла.

Необхідні початкові дані і результати експериментальних досліджень взято в роботі [23].

На рис. 5 приведена залежність від часу температури поверхні підлоги і пароповітряної суміші всередині приміщення: суцільні лінії — розрахунок, точки — експеримент. Як видно з рис. 5, результати моделювання досить добре узгоджуються з експериментальними даними як за температурою поверхні шару бетону, так і за температурою пароповітряної суміші всередині приміщення.

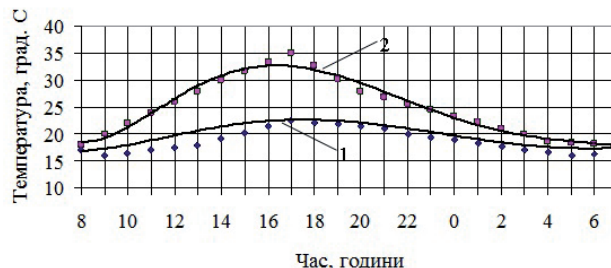


Рис. 5. Залежність від часу температури поверхні підлоги і пароповітряної суміші всередині приміщення; 1 — температура пароповітряної суміші всередині приміщення; 2 — температура поверхні шару бетону; суцільні лінії — розрахунок, точки — експеримент

На рис. 6 подається розподіл температури по висоті в центрі приміщення.

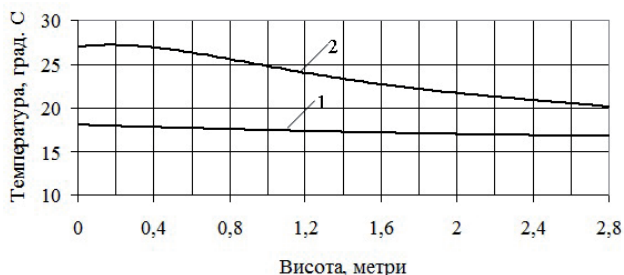


Рис. 6. Розподіл температури по висоті приміщення: 1 — для 8-ої години, 2 — для 21-ої години

З рис. 6 випливає, що температура в приміщенні ближче до підлоги (на рівні ніг) дещо вища, ніж на рівні голови, а отже тепловий процес у приміщенні з теплоакумуючою підлоговою системою електричного опалення забезпечує більш комфортні умови для людини. Крім того, при такій системі опалення до 46 % тепла надходить у приміщення будівлі за рахунок променевого випромінювання. А це означає, що можна суттєво економити ресурси на нагрів повітря. Результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Серед сильних сторін даного дослідження варто відмітити, що одержані результати дозволяють:

- 1) подати будь-яку функціонально-конструктивну схему будівлі з єдиних позицій, що важливо при математичному моделюванні процесів, які в ній протікають;
- 2) звести взаємозв'язаний і взаємообумовлений тепловий процес у будь-якій складній архітектурно-конструктивній структурі будівлі невіробничого призначення до процесів в елементарних елементах (частини

огороджувальної конструкції, пароповітряний простір, вплив систем освітлення і опалення, сонячної радіації).

Weaknesses. До слабких сторін даного дослідження варто відмітити те, що час реалізації запропонованого алгоритму великий (до 1-єї години). А це суттєво при розв'язуванні задачі оптимізації. Цей недолік певною мірою компенсується використанням на певних етапах реалізації задачі оптимізації більш простих моделей (одновимірної задачі теплопровідності і квазістаціонарної моделі конвективного теплообміну).

Opportunities. Планується застосувати одержані результати для аналізу теплових процесів в інших об'єктах, для яких характерні багатопверхні поверхні.

Threats. Є зарубіжні аналоги розробленого програмного комплексу. Проте на сьогодні не опубліковані методи аналізу теплового процесу, які закладені в ці програми, і закритий їхній код.

8. Висновки

1. Побудована розрахункова структура будівлі у вигляді дерева, найнижчим рівнем якої є елементарний елемент. Під елементарним елементом розуміється складові огороджувальної конструкції і скінчені частини пароповітряної суміші: кімната, частина сходів, частина горища, частина підвалу, в яких спостерігатися один і той же визначаючий теплофізичний процес (конвекція, теплопровідність, променеве випромінювання).

2. В рамках об'єктно-орієнтованої методології ОМТ — Object Modeling Techniques, побудована функціональна (встановлюється взаємодія окремих частин системи як за даними, так і за управліннями у процесі її роботи) і об'єктна (подаються статичні, структурні аспекти системи, пов'язані з даними) моделі аналізу тепловтрат у будівлі невиноробничого призначення. Динамічні моделі (які описують роботу окремих частин системи) подаються в роботах [16, 17]. Таким чином завершена побудова об'єктно-орієнтованої моделі аналізу тепловтрат у будівлі невиноробничого призначення.

Приведене дослідження теплового процесу в приміщенні будівлі з теплоакмулюючою підлоговою системою електроопалення. Встановлено, що температура в приміщенні ближче до підлоги (на рівні ніг) дещо вища, ніж на рівні голови, а отже тепловий процес у приміщенні з такою системою опалення забезпечує більш комфортні умови для людини. Крім того, при такій системі опалення до 46 % тепла надходить у приміщення будівлі за рахунок променевого випромінювання.

Література

1. The Home of DOE-2 based Building Energy Use and Cost Analysis Software [Electronic resource]. — Available at: \www/URL: <http://www.doe2.com/>
2. EnergyPlus Energy Simulation Software [Electronic resource] / U.S. Department of Energy. — Available at: \www/URL: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
3. Statens byggeforskningsinstitut [Electronic resource]. — Available at: \www/URL: <http://www.sbi.dk/indeklima/simulering>
4. ESP-r [Electronic resource]. — Available at: \www/URL: <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>
5. Crawley, D. B. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs [Text] / D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, B. T. Griffith // *Building and Environment*. — 2008. — Vol. 43, № 4. — P. 661–673. doi:10.1016/j.buildenv.2006.10.027

6. Judkoff, R. Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations [Electronic resource]: Report / R. Judkoff, D. Wortman, B. O'Doherty, J. Burch. — National Renewable Energy Laboratory, April 2008. — 192 p. — Available at: \www/URL: <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42059.pdf>. doi:10.2172/928259
7. Zhu, D. A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E [Text] / D. Zhu, T. Hong, D. Yan, C. Wang // *Building Simulation*. — 2013. — Vol. 6, № 3. — P. 323–335. doi:10.1007/s12273-013-0126-7
8. Gorshkov, A. S. Properties of the wall structures made of autoclaved cellular concrete products on the polyurethane foam adhesive [Text] / A. S. Gorshkov, N. I. Vatin // *Magazine of Civil Engineering*. — 2013. — Vol. 40, № 5. — P. 5–19. doi:10.5862/mce.40.1
9. Korniyenko, S. V. Settlement and experimental control of energy saving for buildings [Text] / S. V. Korniyenko // *Magazine of Civil Engineering*. — 2013. — Vol. 43, № 8. — P. 24–30. doi:10.5862/mce.43.4
10. Petrosova, D. V. A field experimental investigation of the thermal regime of lightweight building envelope construction [Text] / D. V. Petrosova, N. M. Kuzmenko, D. V. Petrosov // *Magazine of Civil Engineering*. — 2013. — Vol. 43, № 8. — P. 31–37. doi:10.5862/mce.43.5
11. Семашко, С. Е. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов в защитной оболочке при наличии пассивного конденсатора в системе пассивного отвода тепла [Текст] / С. Е. Семашко, В. В. Безлепкин, М. А. Затевахин, О. И. Симакова, И. М. Ивков // *Атомная энергия*. — 2010. — Т. 108, № 5. — С. 308–312.
12. De la Rosa, J. C. Review on condensation on the containment structures [Text] / J. C. de la Rosa, A. Escrivá, L. E. Heranz, T. Cicero, J. L. Muñoz-Cobo // *Progress in Nuclear Energy*. — 2009. — Vol. 51, № 1. — P. 32–66. doi:10.1016/j.pnucene.2008.01.003
13. Богословский, В. Н. Тепловой режим здания [Текст] / В. Н. Богословский. — М.: Стройиздат, 1979. — 248 с.
14. Эккерт, Э. Р. Теория тепло- и массообмена [Текст] / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. — М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1961. — 681 с.
15. Booch, G. Object-oriented analysis and design [Text] / G. Booch. — Addison-Wesley Publishing Company, 2007. — 534 p.
16. Єрохін, А. Л. Інформаційна технологія аналізу конвективного теплообміну в приміщенні будівлі [Текст] / А. Л. Єрохін, Г. А. Зацеркляний // *Системи обробки інформації*. — 2016. — № 9 (146). — С. 187–192.
17. Куценко, О. С. Моделирование теплообміну через огороджувальні поверхні будівлі [Текст] / О. С. Куценко, Г. А. Зацеркляний // *Вісник НТУ «ХПИ»*. — 2013. — № 3 (977). — С. 129–141.
18. Weitzmann, P. Modelling building integrated heating and cooling systems [Text]: PhD thesis / P. Weitzmann. — Kongens Lyngby: Department of Civil Engineering, 2004. — 239 p.
19. Львовский, И. Б. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещения [Текст]: пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91 / И. Б. Львовский, Б. В. Баркалов. — Москва, 1993. — 32 с.
20. Building automation — impact on energy efficiency [Text]: Application per EN 15232:2012 eu.bac product certification. — Siemens Switzerland Ltd, 2012. — 132 p.
21. Ma, C.-C. Analytical exact solutions of heat conduction problems for anisotropic multi-layered media [Text] / C.-C. Ma, S.-W. Chang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2004. — Vol. 47, № 8–9. — P. 1643–1655. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.10.022
22. Dryden, I. G. C. The Efficient Use of Energy [Text] / I. G. C. Dryden. — Ed. 2. — Oxford: Butterworth Scientific, 1982. — 604 p. doi:10.1016/c2013-0-00885-7

23. Черных, Л. Ф. Тепловые режимы помещений при энергосберегающем теплоаккумуляционном напольном электроотоплении [Текст] / Л. Ф. Черных // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. — 2010. — Вип. 36. — С. 83–96.

РАЗРАБОТКА ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОПOTЕРЬ В ЗДАНИИ НЕПРОИЗВОДСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предложена методика построения расчетной структуры любой конструктивно-функциональной схемы здания непроизводственного назначения. Эта структура позволяет рассматривать с единых позиций любой взаимосвязанный и взаимообусловленный тепловой процесс. Показано, как в рамках объектно-ориентированной методологии Object Modeling Techniques построить функциональную и объектную модели для анализа теплопотерь в здании. Приведен пример, демонстрирующий применение полученных результатов.

Ключевые слова: расчетная структура здания непроизводственного назначения, объектно-ориентированная модель,

теплопотери, теплоаккумулирующая напольная система электрического отопления.

Ерохін Андрій Леонідович, доктор технічних наук, професор, кафедра програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Зацеркляний Георгій Альбертович, аспірант, кафедра програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна, e-mail: george.zatserklyany@gmail.com.

Ерохин Андрей Леонидович, доктор технических наук, профессор, кафедра программной инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина.

Зацеркляный Георгий Альбертович, аспирант, кафедра программной инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина.

Yerokhin Andriy, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Zatserklyanyi Heorhii, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, e-mail: george.zatserklyany@gmail.com