

БЕЗЖИЧНА СЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЛЕНИЕ НА ОСВЕТЛЕНИЕ В ИНДУСТРИАЛНИ СГРАДИ

WIRELESS SENSOR NETWORK FOR INTELLIGENT LIGHTING CONTROL IN INDUSTRIAL BUILDINGS

Марин Б. Маринов

Технически университет - София

Борислав Ганев

Технически университет - София

Георги Николов

Технически университет - София

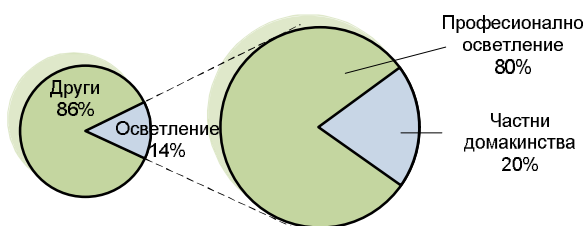
Abstract

The market for lighting controls in industrial buildings has changed and expanded significantly in recent years. In industrial environments with conventional lighting control, illumination is usually left on permanently, regardless of whether activities are performed or not in the area. This leads to unnecessary energy expenditure. In this work a more specific application related to energy-efficient lighting control in industrial buildings is considered. According to the proposed solution, illumination levels in the different building areas are controlled depending on the presence or absence of persons or vehicles in the corresponding areas. The research presented in this paper aims to evaluate the possibility for using relatively low-cost and easily expandable RF-based indoor localization techniques for lighting control in industrial environments. The implementation of the localization system utilizes the RSSI of a ZigBee-based sensor network and fingerprinting positioning algorithms.

Keywords: energy saving, indoor localization, lighting control, RSS, ZigBee.

I. ВЪВЕДЕНИЕ

През 2010 г. консумацията на електроенергия за осветление в жилищни, търговски и промишлени сгради възлиза на около 14% от общото потребление на електроенергия в Европейския съюз – ЕС (фиг. 1). В офис сгради делът на осветлението заема между 30% и 40% от общото потребление на енергия, а типичните нива за годишната консумация на електроенергия, за осветление на квадратен метър, варират от 20 до 50 kWh/m². Редица статистически изследвания показват, че осветлението има доминираща роля, като потенциал за пестене на енергия в търговския сектор [1, 2].



Фиг. 1. Дял на годишна консумация на електроенергия за осветление в ЕС: 14% от генерираната енергия или 180 млн. тона CO₂ годишно [3].

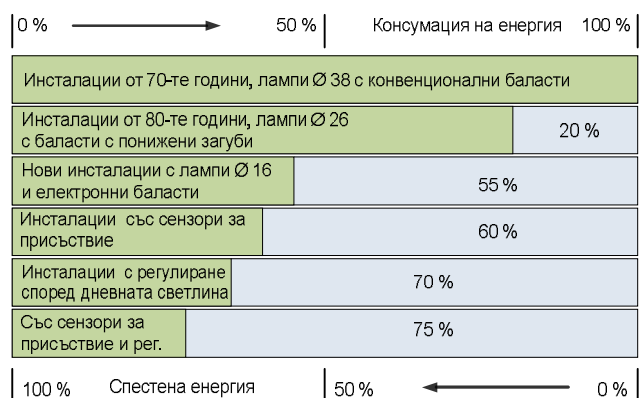
В световен мащаб е налице ясна тенденция за намаляване на консумацията на електроенергия за осветление, до нива под 10 kWh/m² годишно, чрез въвеждане на нови технологии. Наред с използването на източници с висока светлинна ефективност и на дневната светлина, редица подходи залагат и на интелигентни системи за управление на осветлението, базирани на модерни информационни и комуникационни технологии. Основни фактори, определящи необходимостта от осветление в дадена сграда, са нейният вид, разпределението на пространствата в нея, заетостта ѝ и

времето от денонощието. Следователно е необходимо основните функции на системите за управление на осветлението и стратегиите за управление да вземат под внимание тези аспекти и да включват:

- Работа по график. Системата за управление трябва да позволява задаване на работен режим според предварително зададен график за включване и изключване на различни компоненти на осветлението.
- Сензори за присъствие. За пространства в сградите, където заетостта е трудно да бъде предварително определена (като заседателни зали, сервисни помещения и др.), светлинните източници трябва да бъдат включвани и изключвани с помощта на сензори за присъствие.
- Използване на дневна светлина. За да се намалят разходите за осветление, системите за управление трябва да позволяват максимално използване на естествена светлина (т.нар. „събиране на дневна светлина“ или „daylight harvesting“).
- Използване на прозорци със спектрално селективни покрития. Особено в горещи климатични зони, със значителни нива на слънчевата радиация, е необходимо да се филтрират компонентите на слънчевото лъчение, генериращо топлина, за да се минимизират трансмисионните загуби на лъчението във видимия спектър [4].

През последните 15 години осветителната индустрия разви нови технологии, които създават голям потенциал за икономии в областта на осветлението. Иновативните системи за вътрешно осветление могат да работят над три пъти по-ефективно от съществуващите и да пестят до 75% от електроенергията. Изследванията показват, че целият потенциал за пестене на енергия може да се реализира само с прилагане на цялостни решения, използващи не

само модерни осветителни тела, но и интелигентни системи за управление, със сензори за осветеност, движение, присъствие и др. [5, 6].



Фиг. 2. Потенциали за пестене на електроенергия за осветление [6].

Въпреки значителните икономии, които могат да генерират, интелигентните системи за осветление все още не намират широко приложение в индустриалните сгради. Основно предизвикателство, което пречи на навлизането на тези системи, са високите разходи за модернизиране на наличните конвенционални системи за осветление. Модернизирането е свързано със съществени промени на окабеляването, което обикновено е разположено на труднодостъпни места и това води до значително осъбяване на проектите.

Използването на безжични сензорни мрежи, при реализирането на интелигентни системи за осветление, все повече се налага като обещаващ подход. Множество изследвания доказват предимствата на безжичните сензорни мрежи при реализация на модерни системи за управление на осветлението [7, 8]. Представените в настоящата публикация изследвания целят оценка на възможността за използване на безжични сензорни мрежи, базирани на стандарта IEEE 802.15 (ZigBee), за реализиране на интелигентни системи за управление на осветлението в индустриални сгради при сравнително ниска цена. Приложението на сензорните мрежи е в две направления – за локализиране на обекти в затворени помещения и за реализиране на актуаторни модули за димиране на осветителни тела, без да са необходими сложни реконструкции и допълнително окабеляване.

II. МОТИВАЦИЯ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЛЕНИЕ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО

Задачата за локализиране и навигиране на хора и устройства в закрити помещения става все по актуална при решаването на редица проблеми в областта на автоматизацията. Системите за локализация и навигация на обекти в закрити помещения вече успешно се използват за решаване на разнообразни транспортни и логистични задачи в индустриални сгради. Следвайки логиката на развие на сателитната навигация, понастоящем усилията са насочени за подобряване на качеството на услугите в сгради. Подобряването на качеството и сигурността на локализирането и навигацията на обекти на закрито има потенциала да открие множество нови възможности в областта на автоматизацията и енергоспестяващите технологии.

В работата се разглежда едно по-специфично приложение, свързано с енергийно-ефективното управление на осветлението в индустриални сгради и складови пространства. При това решение нивата на осветеност в зоните се управляват в зависимост от наличието или отсъствието на транспортни средства и оператори в отделните складови зони.

В индустриални сгради с конвенционално управление на осветлението, то обикновено е включено непрекъснато, независимо дали в съответната зона се извършват дейности или не. Това води до ненужен преразход на електроенергия за осветление.

Настоящата разработка цели, с помощта на система за локализиране на обекти на закрито, да се локализира транспортните средства и хората, извършващи различни дейности, и да се активира осветление със зададена интензивност само в съответните зони.

Избраният обект за провеждане на изследванията включва складова част и ограничен брой монтажни и опаковъчни работни места. За да се направи оценка на потенциала за пестене на енергия за осветление, са използвани статистически данни за разходите на енергия за 1 м² площ [9]. Допълнително е направена оценка на типичните стойности за процента заети с дейности площи, спрямо общата площ на склада, с помощта на Метода на случайните моментни наблюдения [10]. За провеждане на мултимоментните заснемания е използван опростеният модел на осветяваните пространства, представен на фиг. 3.

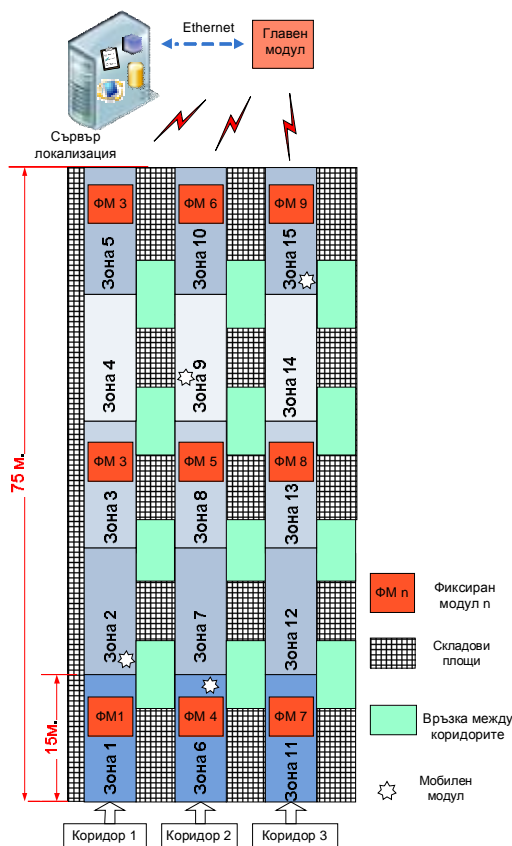
Въз основа на проведените мултимоментни заснемания може да се установи с ниво на статистическа достоверност 95%, че процентът на зоните, заети с активна логистична дейност, най-често се колебае в интервала 35-40%. При около 20% от проведените наблюдения се достигат нива на заетост от 60-65%. Дори при разглежданията да се вземе за основа този по-неблагоприятен случай, може да се приеме, че потенциалът за пестене на енергията е над 35%.

Или при типични разходи за осветление 3-3,5 евро/м² за година, ще се получи потенциал за пестене на разходи за осветление от порядъка на 1-1,25 евро/м² за година. Така например за склад с площ от порядъка на 10 000 м², потенциалът за пестене е от порядъка на 10 – 12 000 евро, като при това се очаква постоянно да нараства, съобразно растящите цени на електроенергията. Тези разглеждания са важни и за избора на подходяща технология за решаване на задачата за локализиране на обекти в сгради, която е разгледана по-нататък в работата.

АРХИТЕКТУРА НА БЕЗЖИЧНА СЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА ЛОКАЛИЗАЦИЯ НА ОБЕКТИ В СГРАДИ

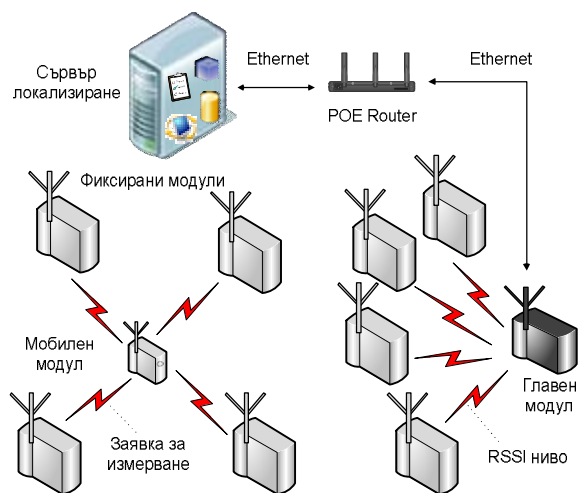
В разработката се прилага метод за локализиране на обекти, използващ индикацията за мощността на приетия сигнал (RSSI- Received Signal Strength Indicator) в безжични сензорни мрежи, базирани на стандарта ZigBee.

Избран е подход, при който над пространствата, които се осветяват, са монтирани определен брой фиксирани модули – (ФМ), с помощта на които се определя положението на мобилните модули (ММ).



Фиг. 3. Опростен модел на осветяваните пространства за провеждане на мултимоментни заснемания.

Мобилните модули са безжични устройства, които изпращат периодично пакети данни до съседните фиксирани сензорни модули (в зоната, където се намират и в съседните зони). Фиксираните модули измерват мощността на получения сигнал (RSS) и изпращат данните до т.нар. Главен модул (Master node), който служи като концентратор на данни за зададена група от фиксирани модули. Това сегментиране се налага от съображения за редуция на обема на предаваните по мрежата данни и подобряване на устойчивостта на комуникацията в нея. Обикновено са налице множество мобилни устройства, прикрепени към транспортни средства и хора, и затова всеки пакет данни е съпроводен с уникалния идентификатор на устройството. Главните модули осъществяват предварителна обработка и препредаване на данните до т.нар. Сървър за локализиране (СЛ), който осъществява локализирането на обектите в помещението (фиг. 4).



Фиг. 4. Система за локализация на закрито, използваща измерване на мощността на приетия сигнал (RSS) в ZigBee сензорна мрежа.

А. Позициониране на фиксираните модули

Гъстотата на разположение на фиксираните модули зависи от изискваната точност за позициониране, от спецификата на помещенията и от някои допълнителни ограничения. При конкретната реализация изискванията за точността на локализиране са ниски. Избрани са дискретни зони за локализация на обекти и съответно за управление на осветлението над тях, с приблизителна дължина от 15 м и ширина около 2,2 м. При тази конфигурация за всяка зона е предвиден по един неподвижен приемник, респ. тя непосредствено да граничи с два приемника (вж. фиг. 3).

Б. Събиране на данни

Системата използва информация от ограничен брой съседни фиксирани сензорни модули при определяне на позицията на мобилните модули. За целта се задава праговата стойност за мощността на приетия сигнал за всеки фиксиран модул. Фиксираните модули предават данни на Главния модул, само ако мощността на приетия от мобилния модул сигнал, надхвърля зададената прагова стойност. Този подход позволява, чрез подходяща промяна на праговите стойности, ефикасна редуция на обема на обменяни данни.

Дефинирани са два основни вида съобщения в системата:

- Заявка за измерване (Message: Measurement request).
Чрез това съобщение мобилните модули подават заявка към фиксираните модули за измерване на мощността на получения сигнал. Тъй като заявките не се отправят към определени фиксирани модули, то съобщението се предава чрез бродкастинг. За да се разграничат отделните заявки за измерване, към тях се включва и поредният им номер. За целта се използва брояч, чиято стойност нараства при всяка заявка за измерване.
- Съобщение за измерената мощност на сигнала (Message: Received signal strength)
Чрез това съобщение фиксираните модули предават на главните модули данни за измерената мощност на сигнала (RSS). То съдържа, наред с измерената стойност за сигнала, последователен номер и идентификатора на съответния мобилен сензорен модул.

РЕАЛИЗАЦИЯ НА БЕЗЖИЧНА СЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО УПРАВЛЕНИЕ НА ОСВЕТЛЕНИЕТО

А. Сензорни модули

Модулите са реализирани на базата на хардуерната платформа PINGUINO-OTG. Основните характеристики на тази платформа са:

- PIC32MX440F256H 80 MHz микроконтролер;
- 256KB flash и 32KB RAM;
- Захранване от Li-Ion акумулаторна батерия с вградена зарядна електроника;
- Надеждна работа в промишления температурен диапазон (-25 +85°C).

Всички модули използват 2,4 GHz IEEE 802.15.4 приемопредавател MRF24J40MA, разполагащ с вградена антена, SPI интерфейс и поддръжка на протоколите ZigBee и MiWi. Тъй като мобилният модул е захранван от батерии, комуникацията с фиксираните модули не е постоянна. На програмно задавани интервали (обикновено до 2-3 пъти в секунда) мобилните модули правят опит за връзка с фиксираните модули, при което изпращат своя идентификационен номер, пореден номер на съобщението и данни за нивото на сигнала (RSS). След това те отново преминават в енергоспестяващ режим.

Фиксираните модули съдържат по два приемопредавателя MRF24J40MA – единият е за връзка с мобилните модули, а другият се използва за връзка с главен модул и предварително зададен набор от фиксирани сензорни модули. И двата приемопредавателя работят непрекъснато. Те дават допълнителна информация за тяхното състояние, така че евентуални хардуерни проблеми с фиксираните модули да бъдат своевременно открити.

Към всеки главен модул е добавен Ethernet контролер ENC28J60 със собствен IP адрес и с SPI интерфейс. Той приема данни от асоциираните с него фиксирани сензорни модули и ги изпраща към Сървър за локализиране по Ethernet интерфейс.

След локализирането на мобилните модули в отделните зони, Сървърът за локализиране установява кореспондиращите адреси за осветителните тела и ги изпраща на контролера на осветлението с интерфейс DALI (Digital Addressable Lighting Interface).

Контролерът за осветлението е реализиран на базата на програмируемия логически контролер 750-842 на фирмата WAGO с DALI/DSI модул 750-641 [11, 12].

Б. Интерфейс DALI

По своята същност DALI е индустриален стандарт, който създава необходимата база за унифициране на компонентите и гарантира пълна взаимозаменяемост на продуктите от различни производители. При него всеки актуатор притежава собствен адрес, на който получава команди и връща по интерфейса информация за актуалното си състояние. Налице е възможност за включване към мрежата, наред с актуаторите на разнообразни сензори, които дават възможност за автоматично управление на осветлението по осветеност или присъствие. Броят на индивидуалните адреси е ограничен до 64. Стандартът предполага обединяването на тези 64 адреса в 16 групи, с цел по-лесно и по-удобно задаване на конкретни светлинни сцени.

Съществено преимущество на системата DALI е възможността за получаване на обратна информация за работата на светлинните източници. По отношение на пусково-регулиращата апаратура се получава обратна информация за: включен/изключен източник, повреда в лампа, отсъствие на запалване, прегряване на баласта, дефекти в осветителните тела и други. Предаването на данни се осъществява по стандартна самостоятелна двупроводна линия, чиято максимална дължина между две устройства не бива да превишава 300 m. Връзката е двупосочна, скоростта на обмен на данни е 1,2 kbps [12].

В. Димиране на осветлението

Важен аспект, при реализирането на енергийно ефективни осветителни системи, е възможността за димиране на осветителните тела. Това позволява ефективното използване на дневната светлина и на други светлинни източници за постигане на зададените нива на осветеност в различните работни зони.

Понастоящем се използват два стандарта за димиране - аналогов 1 – 10 V и цифров DALI, като стандартът DALI почти изцяло е изместил аналоговия, преди всичко благодарение на по-широката си функционалност. Използването на аналогова управляваща система от вида 1 - 10 V също дава възможност към мрежата да се свържат устройства от различни производители, но не позволява лесно индивидуално адресиране. Това предполага едновременна работа на устройствата с едно и също ниво на светлинно излъчване. При системата 1 – 10 V отсъства и обратната връзка, чрез която да се получава информация за актуалното състояние на устройствата.

В стандарта DALI интензивността на излъчване се задава посредством 8-битово число. Стойността 0 означава, че източникът не е включен, 1 съответства на 0,1% интензивност и 254 съответства на 100% интензивност. Зависимостта на интензивността на светлината от управляващото двоично число е логаритмична, но поради особеностите си човешкото око я възприема като линейна. Всички баласта и контролери в стандарта се придържат към дефинираната логаритмична крива [12, 13].

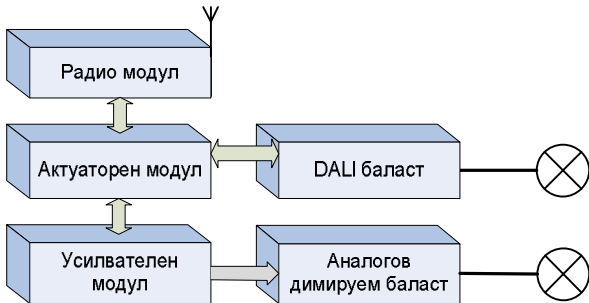
Г. Актуаторен модул

В рамките на представения проект е разработен безжичен модул за управление на димируеми баласта, който позволява лесно интегриране на модулите в налични системи за управление на осветлението, използващи стандарта DALI. Така е възможно разширяване на наличните осветителни системи без скъпоструваща реконструкция.

Актуаторният модул е предназначен основно за управление на флуоресцентни лампи, които са най-често използваните в производствени и офис сгради. Налице са две алтернативи за управление на интензивността на излъчване: цифрово - чрез подаване на съответни команди по DALI интерфейс или аналогово - с напрежения 1 – 10 V.

Блоквата схема на разработения модул е показана на фиг. 5. Модулите са предназначени за монтаж в корпусите на осветителните тела и захранването е директно от мрежата. След изправителната схема, с два регулатора се генерират захранващите напрежения: 3 V за процесора и

радиомодула, 12 V за усилвателното стъпало, чрез което се генерират напрежения 1 – 10 V за баласта с аналогов интерфейс за димиране. За генериране на напреженията 1 – 10 V е избрано просто решение с потенциометър, управляван по SPI интерфейс с 256 дискретни нива и неинвертиращ усилвател. Чрез таблица на съответствие се задават аналогови нива, които кореспондират с интензивността на излъчване за съответните кодове, според стандарта DALI.



Фиг. 5. Блокова схема на актуаторния модул.

За цифрово управление на димируемите баласта е използвана стандартна реализация на DALI интерфейс с микроконтролер MSP430F2xxx. Важно е галваничното развързване с оптрони между физическия слой на DALI интерфейса и микроконтролера [14].

Нивата на светлинно излъчване и скоростта на димиране се задават чрез набор от стандартни DALI команди. Допълнително в модула е вградено и реле, чрез което захранването на лампите може да бъде напълно изключено.

Основните хардуерни компоненти, на системата за интелигентно управление на осветление, са показани на фиг. 7.

Д. Алгоритъм за позициониране

Съществуват две основни групи алгоритми за позициониране, базирани на радио честоти:

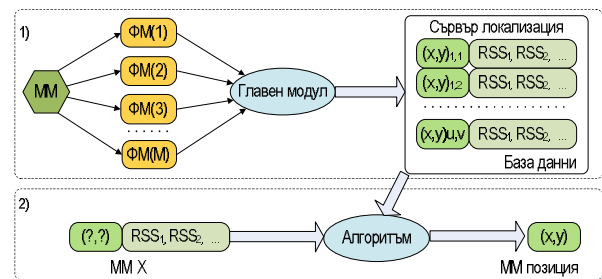
- Основаващи се на оценките на абсолютни разстояния от точка до точка и/или на ъгли (range-based);
- Не изискващи изчисляване на отстояния, ъгли или на данни за нивото на приемания сигнал (range-free).

Алгоритмите, основаващи се на изчисления на ъгли и разстояния, могат да се разделят допълнително на няколко категории, основните от които се базират на модела на затихване на сигнала (path-loss model) и на карти за силата на приетия сигнал (RSSI-map) [15, 16].

Поради често променящата се обстановка в закрити помещения и сложните механизми на разпространение и затихване на сигнала, постиганите точности за позициониране са ниски. Ето защо, за реализацията на системата е избран алгоритъм, базиран на карти за силата на приетия сигнал – т.нар. „RSS пръстови отпечатъци“.

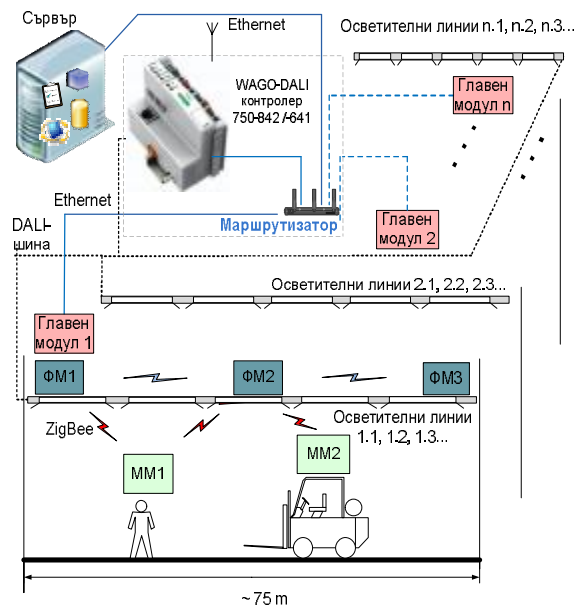
Методът на „пръстовите отпечатъци“ изисква предварително измерване на мощността на приетия сигнал (RSS данни) в определени позиции, за да се създаде база данни, която съдържа „пръстовите отпечатъци“ (етап на обучение). За да се определи позицията на даден мобилен модул (MM), системата първо събира данни от фиксиранияте модули за актуално измерената мощност на

приетия сигнал. Следващата стъпка е сравняването на актуалното измерване с „пръстовите отпечатъци“ в базата данни, при което се търси максимално съвпадение. Двете стъпки на този метод са показани схематично на фиг. 6.



Фиг. 6. Двете стъпки за локализация, използваща метода на „пръстовите отпечатъци“.

Основен недостатък на метода е, че той изисква значителен разход на време, докато се създаде база данни с „пръстови отпечатъци“ с добро качество. Използваните в следващата стъпка алгоритми за локализиране, изискват значителна процесорна мощ и затова този подход е приложим за системи, при които локализирането на обектите става централизирано, какъвто е и конкретният случай.



Фиг. 7. Основни компоненти на системата за интелигентно управление на осветление.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата работа е предложен подход за реализиране на интелигентна система за управление на осветлението в индустриални сгради. Подходът се основава на използване на система за локализиране обекти в сгради с помощта на безжична сензорна система, базирана на стандарта ZigBee.

Системата е тествана в реален обект с площ над 4000 м², включващ складова част и ограничен брой монтажни и опаковъчни работни места. Тестовите са проведени в продължение на над 2 месеца. Те потвърждават

предполагаемия потенциал за пестене на енергия от над 45%, и че изборът на технология за реализация е подходящ.

Резултатите от тестовете показват, че е необходимо да се предприемат мерки за оптимизиране на комуникацията между фиксираните модули, за гарантиране на продължителна устойчива работа на системата.

Част от представените изследвания са осъществени в рамките на проекта "132ПД 0057-03", който е финансово подпомаган от НИС при ТУ-София.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] C. DiLouie, *Advanced Lighting Controls: Energy Savings, Productivity, Technology and Applications*, 1 ред., Fairmont Press, 2005.
 - [2] Navigant Consulting Inc., "Energy Savings Potential of Solid-State Lighting," 2010.
 - [3] J. Waldorf, „Besseres Licht für mehr Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Wohlbefinden," Fachverband Licht im ZVEI, 2011.
 - [4] J. Sinopoli, Smart Building Systems Architects, Owners, and Builders, Burlington: Butterworth-Heinemann, 2010.
 - [5] F. Rubinstein, M. Siminovitch, and R. Verderber, "Fifty percent energy savings with automatic lighting controls," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 4, pp. 768-773, 1993.
 - [6] K. Topp, „Effiziente und innovative Beleuchtung Potenziale, Beispiele und Trends," Fachverband Licht im ZVEI, 2012.
 - [7] W. Y. Lun, Y. L. Che, W. Chi, C. T. Yu и W. Y. Chih, „Autonomous light control by wireless sensor and actuator networks," *IEEE Sens. Journal*, № 10, pp. 1029-1041, 2010.
 - [8] H. Park, M. Srivastava и J. Burke, „Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Intelligent Light Control. *In Proceedings of the 6th Int. Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN'2007*, Cambridge, MA, USA, 25–27 April 2007.
 - [9] S. Cox, L. Graham, „Sustainability Measured: Gauging the Energy Efficiency of European Warehouses," *ProLogis Research Insights*, 2010.
 - [10] REFA - Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e.V., *Methodenlehre der Betriebsorganisation: Datenermittlung*, München: Hanser, 1997.
 - [11] "WAGO-I/O-SYSTEM 750 ETHERNET TCP/IP Programmable Fieldbus Controller 750-842," WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, 2010. [Online]. Available: www.wago.de.
 - [12] "Digital Addressable Lighting Interface," [Online]. Available: <http://www.dali-ag.org>.
 - [13] М. Б. Маринов, „Актуаторни и сензорни модули за интелигентни осветителни системи," в *XII Национална конференция с международно участие "Електроника 2014"*, София, 2014.
 - [14] „Application Report, Digital Addressable Lighting Interface (DALI) Implementation Using MSP430 Value Line Microcontrollers," [Онлайн]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/slaa422a/slaa422a.pdf>. [Отваряно на March 2014].
 - [15] A. Cakiroglu, E. Cesim, "Fully decentralized and collaborative multilateration primitives for uniquely localizing WSNs," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010.
 - [16] R. Mautz, *Indoor Positioning Technologies*, Habilitation Thesis at ETH Zurich, 2012.
- Доц. Марин Беров Маринов, e-mail: mbm@tu-sofia.bg,
Маг. инж. Борислав Т. Ганев, e-mail: b_ganev@tu-sofia.bg,
Доц. Георги Т. Николов, e-mail: gNIKOLOV@tu-sofia.bg,
Технически Университет - София, 1000, бул. „Климент Охридски“ 8, Факултет Електронна техника и технологии, катедра Електронна техника.