

The influence of operating temperature on the efficiency silicon photovoltaic Chinese production showed that with increasing operating temperature reduction efficiency is 0,07 %/°C, which is significantly higher than in device structures of European and domestic production due to unconventional and reduce short-circuit current density.

The method of computer modeling of quantitative exposure light diode characteristics on efficiency has been shown that

lowering efficiency silicon photovoltaic Chinese production is due not only to the traditional reduction diode saturation current density but also decrease in shunt resistance.

Identified temperature dependence of efficiency demonstrates the feasibility of using Chinese-made photovoltaic cells in the construction of photovoltaic thermal plants, which together with the heat pump is part of a combined hot water, heating and air conditioning.

Стаття надійшла до редакції 14.06.17

Остаточна версія 18.08.17

УДК 620.91

В.О.Пундєв¹, В.І.Шевчук², В.А.Хілько³, Бенменні Мухуб⁴ (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Особливості проектування фотоелектричних станцій, що розміщуються на дахах та стінах будівель

Розглянуто особливості проектування фотоелектричних станцій, що розміщуються на дахах та стінах будівель, пов'язані з обмеженістю в площі розміщення фотоелектричних модулів. Бібл. 6, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: дахова фотоелектрична станція, фотоелектрична батарея, фотоелектричний модуль, генерація електричної енергії.

Orcid: ¹0000-0003-3750-8812; ²0000-0002-4176-7799; ³0000-0001-6348-2578; ⁴0000-0001-6548-2205

В останні роки у розвинутих європейських країнах та в деяких інших регіонах світу разом зі стійким подальшим зростанням темпів розвитку фотоенергетики спостерігається зміщення акцентів цього розвитку – будівництво та введення в експлуатацію дахових і стінових фотоелектричних станцій (ФЕС) за своїми темпами випереджає впровадження наземних ФЕС. Це, в першу чергу, пов'язане зі зростаючими труднощами щодо пошуку місця для розташування ФЕС. Традиційне наземне розташування потужних ФЕС потребує великих площ для їх розміщення. За умови дефіциту рівнинних земель несільськогосподарського призначення це призводить до скорочення площ земельних ділянок, або до використання під ФЕС земель с/г призначення шляхом зміни їх призначення, або потребує значних додаткових фінансових витрат на підготовку площадок, розміщених на місцях відпрацьованих

кар'єрів, полігонів захоронення побутових відходів, військових полігонів, ярів тощо.

На користь збільшення темпів та обсягів будівництва дахових та стінових фотоелектричних станцій впливає і те, що вони, як правило, порівняно близько розташовуються до споживачів електричної енергії. У зв'язку з цим не потребується будівництво додаткових трансформаторних підстанцій та високовольтних ліній електропередавання, тому що використовується уже існуюча інфраструктура.

Зупинимось детальніше на особливостях проектування дахових та стінових станцій. Загально-відомо, що основною умовою отримання макси-мальної генерації електричного струму фотоелектричними станціями протягом року є розміщення фотоелектричних модулів (ФЕМ) фронтальною стороною на південь під оптимальним кутом нахилу до горизонту [1, 2], який, на-

приклад, для широти міста Київ становить 35° . Додержання цього правила є важливим і вагомим для великих ФЕС, для яких відхилення від оптимального кута нахилу на $5-15$ і більше градусів може призвести до втрат генерування електричної енергії.

Отримання максимальної генерації електричного струму фотоелектричними станціями протягом року забезпечується також і незатіненням фотомодулів при експлуатації. Це призводить до утворення значних "мертвих зон" між рядами фотобатарей, що можуть досягати декількох метрів і одночасно слугують технологічними проходами, необхідними для нормального експлуатування ФЕС. Тому для великих фотоелектричних станцій наявність широких проходів між рядами фотобатарей є закономірним та необхідним і для їх технологічного обслуговування згідно з умовами експлуатації (переміщення транспортних засобів чи пристроїв для миття ФБ, механізмів для очищення території станції від високої трави, кущів та від снігу і т.п.). Для виконання цих технологічних операцій зазвичай використовуються механічні засоби та пристрої, що мають значні габаритні розміри.

На нашу думку, для дахових та стінових ФЕС, враховуючи їх невеликі потужності, дотримання оптимального кута нахилу фотобатарей до горизонту не є критично важливим, і зменшення об'ємів генерування від зміни кута нахилу ФЕМ відносно оптимального при цьому є незначним і може компенсуватися більш щільним їх розміщенням (збільшенням кількості ФЕМ на одиницю площі). Крім того, ці станції часто обмежені в площі розташування і не потребують значних за розміром технологічних проходів. Тому вважаємо, що для дахових та стінових ФЕС нормальним є розташування фотобатарей під невеликим (значно меншим від оптимального) кутом – таким, який є достатнім для сходження дощу та снігового покриву на фотоелектричних модулях [3].

Це підтверджено та вже відзначено у зарубіжній практиці, де вільних площ дахів, при-

датних для розміщення фотоелектричних станцій, є не так уже й багато, тому при проектуванні дахових ФЕС свідомо доводиться йти на деяке зниження величини генерації. При цьому орієнтація фронтальної площини ФЕМ до лінії горизонту, як правило, визначається кутом у 15° , що в основному ґрунтується на балансі між очікуваним обсягом виробництва електроенергії та кількістю фотоелектричних модулів, які можуть бути встановлені [4, 5]. Проте в кінцевому підсумку виходить вираш у питомій величині вироблення електроенергії з розрахунку на одиницю площі даху при цілком прийнятному терміні окупності.

Слід врахувати, що зі зміною кута нахилу змінюється встановлена потужність ФЕС (відстань між рядами ФЕМ змінюється). Тому при установці ФЕМ під кутом 15° загальна потужність станції на визначеній фіксованій площі розміщення збільшується приблизно на одну третину, наприклад, у порівнянні з варіантом для кута 35° .

При цьому також слід врахувати, що малий кут нахилу ФЕМ знижує вітрове навантаження на покрівлю будівлі. Як наслідок – можна використовувати дахи з невеликою несучою спроможністю та економити матеріали на опорних конструкціях і баластних навантаженнях тощо.

Розглянемо більш детально, як впливає зміна кута нахилу ФЕМ до горизонту на величину генерування. Для цього скористаємося програмою моделювання європейської сонячної бази випромінювання PVGIS-CMSAF [6], яка використовує в своїх теоретичних розрахунках довгострокові, зібрані на протязі більш ніж 20 років, спостереження щодо параметрів сонячного випромінювання для різних регіонів земної кулі.

Проделуємо за допомогою [6] виробіток електричної енергії фотоелектричною станцією з кремнієвими фотоелектричними модулями потужністю 100 кВт протягом року (помісячно), яка розташована на широті м. Київ, для різних кутів нахилу фотобатарей (див. табл. 1).

Таблиця 1. Виробіток електричної енергії ФЕС потужністю 100 кВт зі стаціонарним кутом нахилу ФЕМ

Місяць року	Кут нахилу фотобатарей до горизонту															
	45°				30°				15°				10°			
	E_d	E_m	H_d	H_m	E_d	E_m	H_d	H_m	E_d	E_m	H_d	H_m	E_d	E_m	H_d	H_m
Січень	105,0	3260	1,24	38,5	91,1	2820	1,08	33,4	76,9	2380	0,92	28,5	74,1	2300	0,90	27,8
Лютий	179,0	5010	2,15	60,3	157,0	4410	1,89	52,9	140,0	3910	1,67	46,8	139,0	3880	1,66	46,6
Березень	314,0	9740	3,94	122	296,0	9160	3,69	114	273,0	8450	3,37	105	268,0	8310	3,31	103
Квітень	376,0	11300	4,95	148	377,0	11300	4,95	148	365,0	11000	4,76	143	363,0	10900	4,70	141
Травень	423,0	13100	5,78	179	442,0	13700	6,02	186	446,0	13800	6,03	187	448,0	13900	6,03	187
Червень	415,0	12500	5,70	171	444,0	13300	6,09	183	456,0	13700	6,22	187	459,0	13800	6,23	187
Липень	407,0	12600	5,67	176	432,0	13400	6,00	186	440,0	13600	6,08	188	441,0	13700	6,06	188
Серпень	386,0	12000	5,33	165	399,0	12400	5,49	170	391,0	12100	5,35	166	383,0	11900	5,23	162
Вересень	312,0	9370	4,15	125	304,0	9110	4,02	121	284,0	8520	3,74	112	277,0	8310	3,64	109
Жовтень	225,0	6970	2,87	89,0	210,0	6510	2,67	82,7	186,0	5770	2,36	73,2	177,0	5480	2,25	69,7
Місяць року	Кут нахилу фотобатарей до горизонту															
	45°				30°				15°				10°			
	E_d	E_m	H_d	H_m	E_d	E_m	H_d	H_m	E_d	E_m	H_d	H_m	E_d	E_m	H_d	H_m
Листопад	97,2	2920	1,20	36,1	89,5	2690	1,10	33,1	78,5	2350	0,97	29,2	74,4	2230	0,93	27,9
Грудень	73,9	2290	0,88	27,2	66,2	2050	0,79	24,4	56,2	1740	0,68	21,0	52,3	1620	0,64	19,9
Середнє значення за місяць	277	8420	3,66	111	276	8400	3,66	111	267	8120	3,52	107	264	8020	3,48	106
Сумарне значення за рік	101000		1340		101000		1340		97400		1290		96200		1270	

Примітка. Програма [6] за умови моделювання показує, що оптимальний кут нахилу ФБ на широті м. Києва становить 35°.

В цій таблиці:

E_d – усереднене щоденне значення електричної енергії даної системи в кВт·год;

E_m – усереднене місячне значення електричної енергії даної системи в кВт·год;

H_d – усереднене щоденне значення сумарної енергії сонячного випромінювання на 1 м², що падає на модулі даної системи, в кВт·год/м²;

H_m – усереднене місячне значення сумарної енергії сонячного випромінювання на 1 м², що падає на модулі даної системи, в кВт·год/м².

Як видно з табл. 1, у діапазоні кутів нахилу ФЕМ від 30 до 45 градусів зміни в об'ємах виробітку електроенергії взагалі відсутні. За умови їх установки під кутом 15° та 10° зменшення об'ємів генерування за рік становить усього 3,5% та 4,7% відповідно, що в абсолютних одиницях складає 3700 та 4800 кВт·год. Для великих потужних ФЕС таке відхилення кута нахилу від оптимального може призвести до значних втрат генерування, що становитиме сотні, а то й тисячі МВт·год електричної енергії і є недопустимим.

Вищевказані теоретичні розрахунки підтверджують правильність міркувань, що фактор ущільнення заповнення площі під ФЕС невеликої потужності (збільшення встановленої потужності станції на одиницю площі) може мати більш вагоме значення, ніж кут нахилу її фотоелектричних модулів. Іншими словами, доцільніше встановити більше модулів під меншим кутом за умови значного зменшення при цьому площі "мертвих зон" (відстаней між сусідніми рядами модулів), ніж обирати оптимальний кут нахилу ФЕМ.

Прикладом такого підходу може слугувати проект розташованої в Києві дахової ФЕС, розроблений Інститутом відновлюваної енергетики НАН України в 2016 році. Ця фотоелектрична станція вже побудована та введена в експлуатацію.

В цьому проекті ФЕС у якості основного електроенергетичного обладнання застосовано кремнієві монокристалічні модулі KV260M виробництва компанії ПАТ "Квазар" (Україна),

сертифіковані в системі DEKRA certification GmbH (Німеччина) та електричні інвертори SMA Sunny Tripower 25000TL (Німеччина).

Стационарний кут нахилу фотоелектричних модулів до лінії горизонту було прийнято рівним 15°, що забезпечує мінімальні технологічні проходи між рядами, які становлять 0,915 м, за умови дотримання вимоги їх незатінення та забезпечення самоочищення від дощу та снігу [3].

Модулі встановлені на нерухомих металевих опорах, які кріпляться до бетонних плит – баластів (без безпосереднього кріплення до поверхні даху) на площі дахів близько 1100 м².

В процесі роботи над проектом замовнику було запропоновано до вибору два варіанти розміщення ФЕМ та комплектації обладнання дахової ФЕС (див. табл. 2).

Таблиця 2. Порівняння показників станції для двох варіантів розміщення фотоелектричних модулів

№ з/п	Модулі		Встановлена потужність модулів, кВт	Кількість та потужність інверторів		Абсолютне річне вироблення, кВт·год ¹	Питоме річне вироблення, кВт·год/кВт
	кількість, шт.	орієнтація, град.		шт.	кВт		
1.	406	25,6 та 38,5 на захід	105,56	4	25,0	100700,0	953,96
2.	412	12 та 2 на схід (найменше відхилення від півдня)	107,12	5	20,0	103600,0	961,14

Примітка. Розрахунок теоретичного річного вироблення електричної енергії виконано за допомогою програми моделювання європейської сонячної бази випромінювання PVGIS-CMSAF [6].

За першим запропонованим варіантом компоновки фотоелектричні модулі розміщено паралельно сторонам дахів будівель, але при цьому вони мають орієнтацію за азимутом на південний захід. У другому варіанті модулі орієнтовані за азимутом майже на південь, і за таких умов теоретично матиме місце більший об’єм генерації електричної енергії. Однак другий варіант розстановки не дає можливості забезпечити необхідне безпечне обслуговування модулів через складну форму технологічних проходів. Негативними обставинами цього варіанту також є більша кількість та довжина кабельних ліній, більша кількість захисного обладнання, складність монтажу та більша кількість інверторів меншої потужності (див. табл. 2).

Після аналізу двох варіантів компоновки та обговорення їх із замовником перевага була надана першому варіанту розташування ФЕМ, виходячи з наступних умов:

– мінімізація затінення від розташованих поряд фотоелектричних панелей (кут нахилу фронтальної поверхні ФЕМ до лінії горизонту становить 15°);

– зручність формування лінійок фотоелектричних модулів – з меншою кількістю кабельних вставок та забезпеченням рівнозначності режимів роботи ФЕМ у лінійках, підключених до одного інвертора;

– мінімізація кількості та однотипність інверторів, що пропонуються для встановлення;

– отримання зручних із оптимальними розмірами технологічних проходів для монтажу і подальшого обслуговування (в т.ч. для миття модулів та прибирання снігу);

– встановлення на визначеній площі дахів необхідної замовнику потужності (100-110 кВт).

За умови наявності вищевказаних переваг втрати генерування електричної енергії за рік у зв’язку з орієнтацією ФЕМ на південний захід, як видно з табл. 2, становитимуть всього 0,77% відносно варіанту орієнтації з найменшим досяжним відхиленням від півдня (варіант 2).

Схема розташування ФЕМ на дахах промислових будівель для вибраного та реалізованого варіанту проекту показана на рис. 1.

При цьому за проектом має місце таке розподілення основного обладнання (за кількістю та потужністю):

1. Складський корпус:

Сто фотоелектричних панелей (орієнтація – азимут 25,6 градусів на захід) сумарною потужністю 26,00 кВт, один інвертор потужністю 25 кВт (5 лінійок по 20 ФЕМ).

2. Виробничий корпус:

Триста шість фотоелектричних панелей (орієнтація – азимут 25,6 градусів на захід на східному скаті та 38,5 градусів на захід на

західному скаті) сумарною потужністю 79,56 кВт, 3 інвертори по 25 кВт (на кожен інвертор 3 лінійки по 18 і 3 лінійки по 16 ФЕМ).

Технологічні проходи між рядами фотобатарей, за умови забезпечення незатінення ФЕМ, становлять 0,915 м.

На рис. 2 зображено загальний вигляд ФЕС, встановленої на дахах промислових будівель замовника.

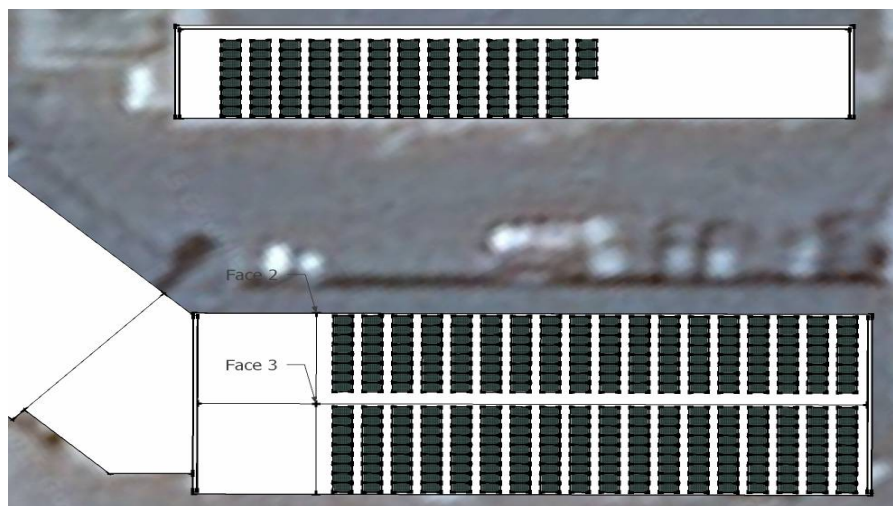


Рис. 1. Схема розташування ФЕМ на дахах промислових будівель замовника.



Рис. 2. Загальний вигляд дахової фотоелектричної станції.

Порівняємо за параметрами вищевказану дахову ФЕС зі станцією, яка має класичну компоновку: орієнтація ФЕМ на південь та розміщення їх під оптимальним кутом нахилу до горизонту, що для широти Києва становить 35°. Розглянемо два варіанти:

– ФЕС має таку ж установлену потужність – 105,56 кВт (що необхідно замовнику);

– ФЕС розміщена на тій же наявній площі дахів – 1100 м².

Використавши програму моделювання європейської сонячної бази випромінювання PVGIS-CMSAF [6], знаходимо (див. таблицю 3):

Таблиця 3. Порівняльні характеристики дахових ФЕС із класичним розміщенням та орієнтацією фотоелектричних модулів та варіантом, вибраним у реалізованому проєкті

Модулі			Встановлена потужність модулів, кВт	Площа дахів, м ²	Абсолютне річне вироблення, кВт·год	Примітка
Кількість, шт.	Орієнтація, град.	Кут нахилу, град.				
406	25,6 та 38,5 на захід	15	105,56	1100,0	100700,0	Зменшення виробітку на 27,5%
278			72,28		73000,0	
406	на південь	35	105,56	1450,0	106600,0	Збільшення виробітку на 5,9% та площі на 31,5%

Як видно з таблиці 3, за умови виконання вимог замовника щодо необхідної встановленої потужності (100-110 кВт) та отримання максимальної генерації електричної енергії, для розміщення ФЕМ дахової ФЕС необхідно збільшити площу дахів на 31,5%. При цьому буде отримано електричної енергії на 5,9% більше, ніж у реалізованому проєкті. Якщо ж орієнтуватися на наявну площу дахів, то за умови максимальної генерації там буде розміщено значно менше ФЕМ (встановленою потужністю всього 72,28 кВт), і при цьому виробіток електроенергії буде на 27,5% меншим у порівнянні з реалізованим проєктом.

Висновки. 1. Запропоноване в цій статті технічне рішення є оптимальним варіантом розміщення ФЕМ на плоских дахах, коли за умови обмеженої площі необхідно отримати ФЕС достатньої потужності.

2. Зменшення кута нахилу ФЕМ дахових та стінових ФЕС приводить не тільки до суттєвого зменшення площі "мертвих зон", які гарантують незатінення фотомодулів, і до збільшення встановленої потужності, а й відповідно до збільшення річного виробітку електричної енергії. На практиці це компенсує недовиробіток електроенергії за умови відхилення від "класичного" кута нахилу фотоелектричних модулів.

3. Термін окупності капітальних вкладень у будівництво ФЕС за умови використання стаціонарного кута нахилу фотоелектричних модулів до лінії горизонту 15° збільшується незначно – приблизно на 3,2% у порівнянні з "класичним" розташуванням ФЕМ, що для м. Київ становить 35°.

4. Зменшення кута нахилу фотоелектричних модулів для дахових та стінових ФЕС приводить також до зменшення вітрового навантаження на ФЕМ. В свою чергу, це приводить до спрощення і здешевлення опорних конструкцій, на яких монтується ФЕМ, до зменшення маси баласту та вагового навантаження на дахи чи стіни будівель, а також у підсумку – до зменшення капіталовкладень у будівництво фотоелектричних станцій.

5. Зменшення кута нахилу фотоелектричних модулів дахових та стінових ФЕС приводить до більш раціонального використання площ дахів та стін будівель і дає можливість звузити технологічні проходи між рядами ФЕМ до розмірів, мінімально необхідних для зручності та безпеки обслуговування станцій.

1. Бекман У. и др. Расчёт систем солнечного тепло-снабжения: Пер. с англ. / У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 80 с.

2. Гамарко А. В., Пундев В.А., чл.-корр. НАН Украины Резцов В.Ф., к.т.н. Суржик Т.В., Шевчук В.И. Эффективное использование площадок для размещения фотоэлектрических станций. Международный научный журнал "Альтернативная энергетика и экология" № 23(163) 2014. – с. 35-39.

3. Руководство по установке и эксплуатации ФЭ модулей. К. ПАО "Квазар".

4. © International Finance Corporation. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. A project Developer's Guide.

5. © Nikkei Business Publications, Inc. 1,000V-mode Boosts Investment Efficiency of Solar Project.

6. Сонячна база випромінювання: PVGIS-CMSAF. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>.

REFERENCES

1. William A. Beckman, Sanford A. Clein, John A. Duffie. Solar Heating design by f-chart method John Wiley and Sons, New-York, 1977.

2. A.V. Hamarko, V.O. Pundev, V. F. Reztsov, T.V. Surzhik, V.I.Shevchuk. *Effective use of platforms for area of PV plants. International scientific magazine "The Alternative Power Engineering and Ecology" No. 23(163) 2014. – page 35-39.*
3. *Kvazar install-manual PV modules. PJSC Kvazar*
4. *International Finance Corporation. Utility-Scale Solar Photovoltaic Power Plants. A project Developer's Guide.*
5. *Nikkei Business Publications, Inc. 1,000V-mode Boosts Investment Efficiency of Solar Project.*
6. *PVGIS-CMSAF. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>.*

В.А.Пундев, В.И.Шевчук, В.А.Хилько, Бенменни Мухуб
(Інститут возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

Особенности проектирования фотоэлектрических станций, размещенных на крышах и стенах строений

Рассмотрены особенности проектирования фотоэлектрических станций, размещенных на крышах и стенах строений, связанных с ограниченностью в площади размещения фотоэлектрических модулей. Библ. 6, табл. 3, рис. 2.

Ключевые слова: *крышная фотоэлектрическая станция, фотоэлектрическая батарея, фотоэлектрический модуль, генерация электрической энергии.*

Pundiev V., Shevchuk V., Hilko V., Benmenni Muhub (*Institute of the renewable energy, NAS of Ukraine, Kyiv*)

Peculiarities of projection of the pv plants placed on roofs and walls of structures

Peculiarities of projection of the pv plants placed on roofs and walls of structures, the bound to limitation in the area of placement of pv modules are considered. References 6, table 3, figures 2.

Keywords: *On-roof PV plant, PV module, PV array, generation of electric energy.*

SYNOPSIS

Peculiarities of in-roof and facade PV plants projection, which can arise depending on terminating tasks, established by the customer and which in this regard the designer should solve taking into account a number of limitative factors are covered in article. Influence of these factors on parameters of PV plants considered on the example of the PV plant actual project, put into operation, in particular on its efficiency and optional versions of projection which allow to reduce negative impact of the existing restrictions as much as possible are analyzed. By results of detailed consideration peculiarities of projection in-roof and facade PV plants and their analysis conclusions concerning paths of overcoming negative factors at projection of such kind PV plant are drawn.

Стаття надійшла до редакції 30.06.17

Остаточна версія 22.08.17

X МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА - 2017
ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ



7-9

листопада

ОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

ЗА ПІДТРИМКИ:
Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України
Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України

Технічний партнер: **RantiMedia**



МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, Київ, Броварський пр-т, 15
 М "Лівобережна"
 ☎ +38 044 201-11-66, 206-87-86
 e-mail: energo@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.мвц.укр
www.tech-expo.com.ua