

УДК 621.311.21

П.Ф.Васько, докт.техн.наук, **М.Р.Ібрагімова** (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Енергетична ефективність гідроагрегатів у складі малої гідроелектростанції за регулювання її потужності по водотоку

Виконано оцінку енергетичної ефективності гідроагрегатів у складі малої гідроелектростанції та визначено раціональну кількість агрегатів станції за регулювання її потужності по водотоку і природоохоронних обмежень на використання води для виробництва електроенергії.

Ключові слова: витрати води, мала гідроелектростанція, гідроагрегат, енергія, ефективність, імовірність, потужність, продуктивність.

Выполнена оценка энергетической эффективности гидроагрегатов в составе малой гидроэлектростанции и определено рациональное количество агрегатов станции при регулировании ее мощности по водотоку и природоохраных ограничениях на использование воды для производства электроэнергии.

Ключевые слова: расход воды, малая гидроэлектростанция, гидроагрегат, энергия, эффективность, вероятность, мощность, производительность.

Вступ. Інтенсивне використання природних ресурсів уже сьогодні викликало негативні наслідки – від енергетичного виснаження і погіршення якісних показників ресурсів до зміни клімату місцевого та глобального масштабу. Вичерпність викопних паливних ресурсів та ризику атомної енергетики зумовлюють необхідність пошуку альтернативних джерел енергії. Зокрема, відновлювана енергетика спроможна вирішувати питання енергопостачання за незначного впливу на довкілля. Проте сучасний рівень технологій на сьогодні обмежує інтеграцію значних обсягів відновлюваної енергетики до потужних електроенергетичних систем. Пріоритет енергозбереження, екологічності та надійності енергетики визнано на національних та міжнародному рівнях. Так, Стратегія Європейської Комісії "Європа 2020" [1] встановлює завдання збільшення частки відновлюваної енергетики до рівня 20% на 2020 р. Енергетичною стратегією України на період до 2030 р. [2] передбачено збільшення частки відновлюваних джерел енергії в загальному балансі встановлених потужностей до рівня 12,6% (без урахування великих ГЕС). Згідно Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [3], розробленого на вимогу Директиви 2009/28/ЄС, частка енергії з відновлюваних

джерел у валовому кінцевому обсязі виробництва електроенергії повинна досягти 11% (з урахуванням великих ГЕС).

Серед відновлюваних джерел енергії мала гідроенергетика характеризується прогнозованим виробництвом електроенергії, можливістю нарощування власних потужностей виробництва гідрообладнання, покращенням інфраструктури та ряду екологічних факторів. Завдяки високій цінності водних ресурсів для суспільства, вони розглядаються як основа складної водогосподарської системи, діяльність якої повинна відповідати засадам раціонального використання води. Міжнародні положення з управління, використання та охорони водних ресурсів представлені низкою законів та нормативно-правових документів. До основних із них відноситься Конвенція ЄЕК ООН з охорони та використання транскордонних водотоків (Гельсінкі, 1992), положення Конференції з навколишнього середовища і сталого розвитку (Ріо-де-Жанейро, 1992), Водна рамкова директива ЄС 2000/60/ЄС, Керівні принципи розвитку гідроенергетики (Сараєво, 2013) [4].

Виділимо наступні основні експлуатаційні вимоги до малих ГЕС згідно з вищевказаними документами:

- проект малої ГЕС повинен передбачати безперешкодну міграцію риб;

- гідротехнічна система малої ГЕС не повинна викликати будь-які довгострокові деградації біорізноманіття або завдавати серйозної шкоди річковим біокомплексам;

- мала ГЕС повинна функціонувати із забезпеченням такого експлуатаційного режиму роботи, що максимально близько відповідає умовам природного стоку річки.

Постановка задачі. З технологічної точки зору виконання двох останніх експлуатаційних вимог можливе за режиму регулювання потужності малої ГЕС по водотоку [5]. За умови застосування гідроагрегатів з постійною швидкістю обертання вищезгаданий режим експлуатації станції може бути реалізований за традиційного компонування малої ГЕС із декількох агрегатів. Принцип регулювання потужності малої ГЕС по водотоку річки реалізується пуском (зупиненням) окремих гідроагрегатів у складі малої ГЕС відповідно до наявної в певний момент часу витрати води стоку.

Урахування природоохоронних обмежень на використання стоку річки для виробництва електроенергії можуть бути реалізовані шляхом застосування імовірнісних розподілів багаторічних витрат води. Основні вимоги щодо використання води на малій ГЕС визначимо наступним чином:

- використання потоку річки в межах 10-90% забезпеченості річного стоку (безперервне функціонування рибоходів, санітарний попуск, межень, повені та паводки [6]);

- регулювання потужності малої ГЕС по водотоку річки.

За даних умов водокористування постає задача визначення доцільної кількості гідроагрегатів та їх енергетичної ефективності у складі станції.

Вихідні положення. Розрахункова формула для визначення потужності гідроагрегату в функції витрат води має вигляд [7]:

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta, \quad (1)$$

де $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – густина води; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння; H – напір, за якого забезпечується встановлена потужність гідроагрегату, м; Q – витрата води, $\text{м}^3/\text{с}$;

η – коефіцієнт корисної дії перетворення гідроенергії в електричну.

В подальшому для проведення практичних розрахунків формула (1) буде використовуватися в наступному вигляді:

$$N = 7Q \cdot H. \quad (2)$$

Річний обсяг виробництва електроенергії одним гідроагрегатом W_i та станцією в цілому $W_{ГЕС}$ визначається так:

$$W_i = N_i \cdot T_i, \quad W_{ГЕС} = \sum_{i=1}^n W_i, \quad (3)$$

де T_i – тривалість роботи i -го агрегату протягом року, год; n – кількість агрегатів у складі малої ГЕС.

Кількість працюючих агрегатів у складі малої ГЕС у певний момент часу залежить від величини витрат стоку створу. Витрата води є однією з основних гідрологічних та енергетичних характеристик стоку річки. Вона має стохастичний характер зміни протягом року, і тому в гідроенергетичних розрахунках використовують статистичні результати вимірювань витрат за період не менше останніх 15 років. Природа формування річкового стоку, його випадкові та сезонні коливання в часі викликають необхідність застосування імовірнісних методів оцінки стоку. У вітчизняній практиці гідрологічних досліджень найбільш розповсюджений імовірнісний трипараметричний гамма-розподіл витрат води річкового стоку [8–10]. Особливості застосування цього розподілу у формі Крицького-Менкеля для задач визначення гідроенергетичного потенціалу малих водотоків наведено в роботах [6, 11].

Введемо наступні позначення параметрів імовірнісного розподілу у формі Крицького-Менкеля: C_V – коефіцієнт варіації; C_S – коефіцієнт асиметрії; k_p – модульний коефіцієнт заданого рівня забезпеченості p , %; Q_p – витрата стоку забезпеченістю p , %; Q_{cp} – середня багаторічна витрата води досліджуваного створу; $k_p = Q_p / Q_{cp}$.

Представимо даний розподіл у виді функції забезпеченості:

$$p(Q) = 1 - F(Q),$$

$$F(Q) = \begin{cases} 0, & \text{при } Q < 0, \\ \left[\frac{\Gamma(\gamma + b)}{\Gamma(\gamma)} \right]^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\Gamma(\gamma) Q_{cp} b} \int_0^Q e^{-\left[\frac{\Gamma(\gamma + b) Q}{\Gamma(\gamma) Q_{cp}} \right]^{\frac{1}{b}}} \left(\frac{Q}{Q_{cp}} \right)^{\frac{\gamma}{b} - 1} dQ, & \text{при } Q \geq 0, \end{cases}$$

де $F(Q)$ – функція розподілу витрат води Q ; γ, b – параметри розподілу, кожній комбінації яких відповідають певні значення коефіцієнта варіації C_V та коефіцієнта асиметрії C_S ; $\Gamma(\dots)$ – гамма-функція відповідного аргументу.

Згідно з [8] функція забезпеченості даного розподілу може бути визначена у вигляді залежності $p(k_p, C_V, C_S)$, яка зазвичай задається в табличному вигляді. Приклад графічного зображення залежності показано на рис. 1. Там же наведено діапазон зміни забезпеченості експлуатаційних витрат згідно з природоохоронними обмеженнями.

Узагальнені дані про середні багаторічні витрати води Q_{cp} , а також значення коефіцієнтів C_V та C_S наведено в офіційних спеціалізованих виданнях [12, 13]. За відсутності даних гідрометеорологічних спостережень можуть бути використані середньозважені значення коефіцієнтів варіації та асиметрії [14].

Подальші розрахункові дослідження будуть виконуватись за умови $k_p = 1$, що знайшла широке застосування при проектуванні та спорудженні малих ГЕС на території України.

Основні розрахункові співвідношення. Витрати води кожного агрегату у складі станції можуть бути охарактеризовані через відповідний модульний коефіцієнт k_{p_i} :

$$Q_i = k_{p_i} \cdot Q_{cp}, \quad k_{p_i} = \frac{k_p}{n}, \quad (4)$$

Тривалість роботи відповідного i -го агрегату визначається наступним чином:

$$T_i = T(p_i - p_{\min}); \quad p_i = f(i \cdot k_{p_i}), \quad (5)$$

де T – розрахунковий період часу (місяць, рік тощо), год; p_i – забезпеченість витрат води i -го гідроагрегату.

Природоохоронні обмеження на використання стоку води встановлюються наступною умовою:

$$p_{\min} < p_i \leq p_{\max}. \quad (6)$$

Значення забезпеченості p_i відповідає початку роботи відповідного гідроагрегату і згідно з (6) не повинне перевищувати 90%, а закінчення роботи агрегату обмежується витратами стоку, що відповідають рівню забезпеченості 10%.

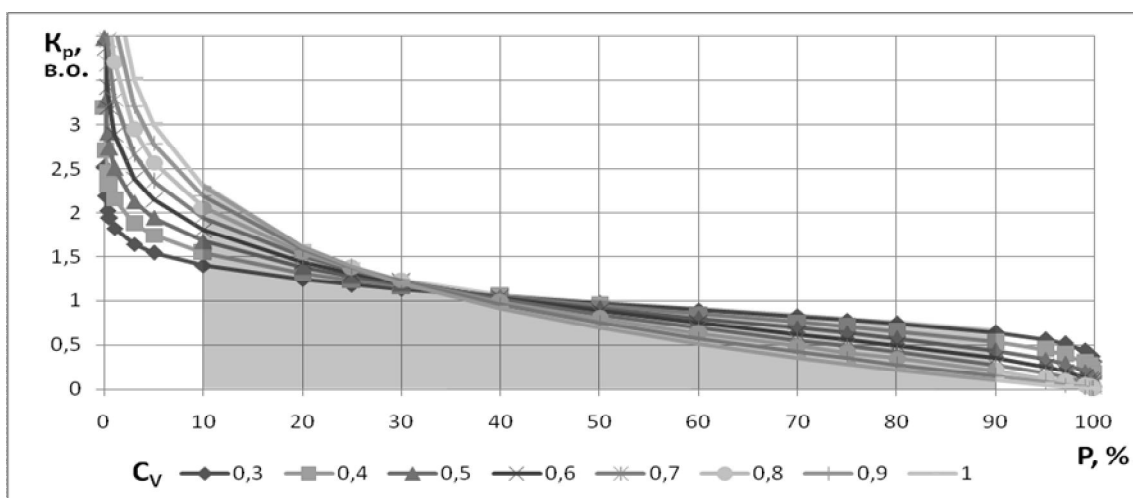


Рис. 1. Залежність модульного коефіцієнта k_p від забезпеченості p ; за $C_S/C_V = 2$, $C_V = 0,3 \dots 1$ та обмеження на використання стоку.

На рис. 2 наведено приклад графічного визначення рівнів забезпеченості витрат води для випадку трьох агрегатів у складі станції.

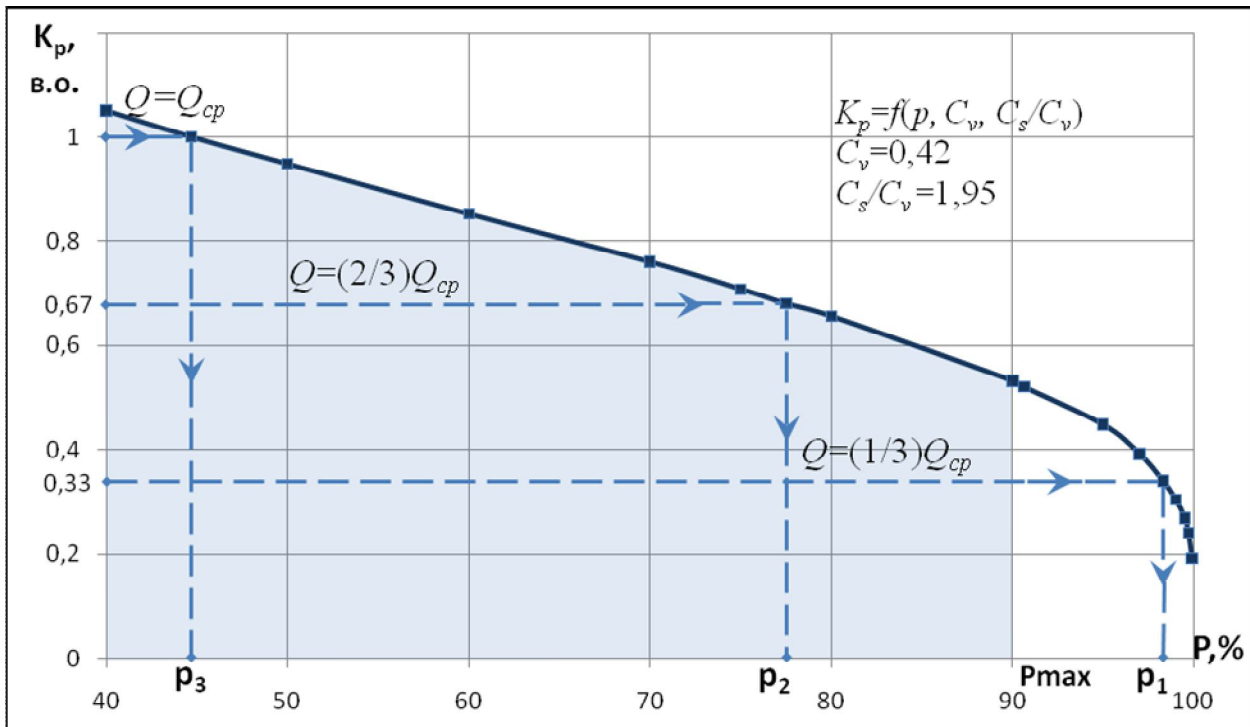


Рис. 2. Визначення рівнів забезпеченості витрат води.

З урахуванням вищевикладеного запишемо формулу визначення річного обсягу генерування електроенергії агрегатом та малою ГЕС (3) наступним чином:

$$W_i = N_i \cdot 8760(p_i - 0,1);$$

$$W_{ГЕС} = N_i \cdot 8760 \left(\sum_{i=1}^n p_i - n \cdot 0,1 \right),$$

де $p_i \leq 0,9$.

За кількісні характеристики енергетичної ефективності гідроагрегатів та станції будемо застосовувати наступні величини:

- коефіцієнт використання встановленої потужності i -го агрегату та станції відповідно, в.о.:

$$K_{\Pi_i} = \frac{W_i}{N_i \cdot T}; \quad K_{\Pi} = \frac{W_{ГЕС}}{(n \cdot N_i) T};$$

- тривалість роботи i -го агрегату та станції відповідно, год:

$$T_i = T(p_i - 0,1); \quad T_{ГЕС} = \max \{ p_1, p_2, \dots, p_i \};$$

- число годин використання встановленої потужності станції, год:

$$T_{\Pi} = \frac{W_{ГЕС}}{(n \cdot N_i)}.$$

Розрахункові результати. Розрахункові дослідження виконувались для варіантів станції у складі 1, 2, 3 та 4 агрегатів однакової потужності за середньобагаторічної витрати стоку $30 \text{ м}^3/\text{с}$ та питомого значення напору 1 м . Значення коефіцієнтів варіації та асиметрії прийняті відповідно $0,42$ та $0,82$ в.о. (відповідають басейновому району р. Південний Буг). Пуск кожного наступного агрегату відбувається при досягненні відповідної величини розрахункових витрат стоку (рис. 2).

Результати розрахунку продуктивності станції та окремих агрегатів у її складі зведено у табл. 1. Для порівняння ефективності роботи окремих гідроагрегатів та ГЕС у цілому за різних варіантів складу станції було застосовано відносні одиниці, де за базову величину використано результати для станції з одним агрегатом. Там же наведені результати за умови виходу з ладу одного агрегату протягом року.

Таблиця 1. Показники продуктивності станції та агрегатів

Кількість агрегатів	Потужність ГЕС, кВт	Обсяг виробітку електроенергії, МВт·год/рік					Приведена продуктивність, в.о.					Приведена продуктивність ГЕС при виході з ладу одного агрегату, в.о.
		агрегат				ГЕС	агрегат				ГЕС	
		1	2	3	4		1	2	3	4		
1	210	637,8				637,8	1,00				1,00	0,00
2	210	735,8	318,9			1055	1,15	0,50			1,65	1,15
3	210	490,6	413,5	212,6		1117	0,77	0,65	0,33		1,75	1,42
4	210	367,9	367,9	274,2	159,4	1169	0,58	0,58	0,43	0,25	1,83	1,58

Відносна продуктивність агрегатів за різних варіантів побудови станції показана на рис. 3. Варіант компоновки станції одним агрегатом можна вважати недоцільним. За двох агрегатів у складі станції відбувається значне збільшення річного обсягу виробництва електроенергії. Зокрема, за такої компоновки обсяг виробництва одного з двох агрегатів навіть більший, ніж у станції з одним агрегатом за двічі більшої встановленої потужності останнього. Подальше збільшення кількості агрегатів несуттєво впливає на продуктивність станції, проте ускладнюється конструкція будівлі і зростають витрати на експлуатацію.

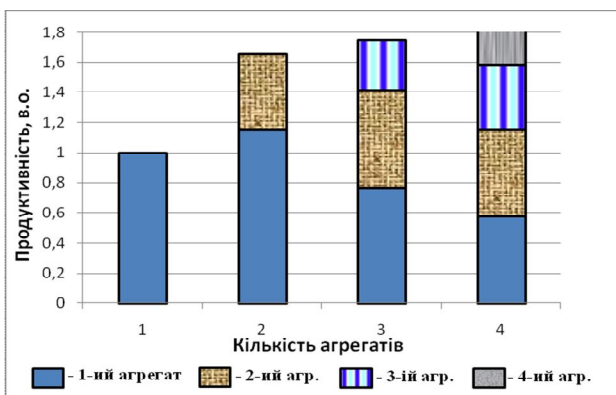


Рис. 3. Частка в обсязі виробітку електроенергії кожним агрегатом малої ГЕС.

Для визначення раціональної кількості агрегатів у складі станції доцільно розглянути також

випадок виходу з ладу одного агрегату. Результати розрахунків за непрацездатності агрегату протягом року наведені на рис. 4. За цієї умови можна вважати раціональною компоновку станції в складі трьох агрегатів. Зазвичай тривалість ремонту одного агрегату менше року, тому отриманий результат характеризує лише якісну зміну обсягів виробництва електроенергії і не претендує на остаточну кількісну характеристику.

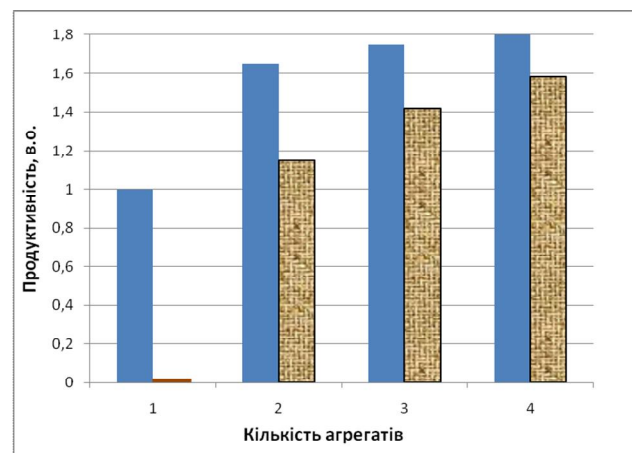


Рис. 4. Зміна продуктивності малої ГЕС при виході з ладу одного агрегату протягом року.

Відповідні значення коефіцієнта використання встановленої потужності, тривалості роботи та числа годин використання номінальної потужності агрегатів і станції наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Показники енергетичної ефективності

Кількість агрегатів	Коефіцієнт використання встановленої потужності, в.о.					Тривалість роботи, год/рік					Число годин використання встановленої потужності ГЕС, год/рік
	агрегати				ГЕС	агрегати				ГЕС	
	1	2	3	4		1	2	3	4		
1	0,35	–	–	–	0,347	3037	–	–	–	3037	3037
2	0,80	0,35	–	–	0,573	7008	3037	–	–	7008	5023
3	0,80	0,67	0,35	–	0,607	7008	5908	3037	–	7008	5318
4	0,80	0,80	0,60	0,35	0,636	7008	7008	5223	3037	7008	5569

Висновки. За регулювання потужності малої ГЕС по водотоку річки та природоохоронних обмежень на використання води для виробництва електроенергії в межах 10-90% забезпеченості річного стоку раціональна компоновка станції полягає у використанні трьох гідроагрегатів. Досяжні значення показників енергетичної ефективності такої станції знаходяться на рівні: коефіцієнт використання встановленої потужності – 60%; число годин використання встановленої потужності – 5300 год/рік; тривалість роботи за рік – 7000 год.

1. *Europe 2020*. A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth / European Commission. Brussels, 3.3.2010, COM (2010) 2020 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLETE%20EN%20BARROSO%20%20%20007%20-%20Europe%202020%20-%20EN%20version.pdf>
2. *Верховна Рада України*. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>
3. *КМУ*. Національний план дій з відновленої енергетики на період до 2020 року. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80/print1434310439242680>
4. *Керівні принципи розвитку гідроенергетики* / Міжнародна комісія по захисту річки Дунай, 18-19 червня

2013 р., м. Сараєво (Боснія і Герцеговина).

5. *Киселев Г.С.* Автоматическое регулирование мощности гидростанций по водотоку. – М.: Энергия, 1973. – 121 с.
6. *Мороз А.В.* Метод аналітичного визначення гідроенергетичного потенціалу створу малої річки на основі лінеаризації імовірного розподілу витрат води // Відновлена енергетика. – 2014. – №4. – С. 69–74.
7. *Гидроэлектростанции малой мощности*. Учеб. пособие / Под ред. В.В. Елистратова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 432 с.
8. *Блохинов Е.Г.* Распределение вероятностей величин речного стока. – М.: Наука, 1974. – 169 с.
9. *Дружинин В.С., Сикан А.В.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебное пособие. Направление "Гидрометеорология". Специальность "Гидрология". – СПб.: изд. РГГМУ, 2001. – 170 с.
10. ДБН В.2.4-8:2014 "Визначення розрахункових гідрологічних характеристик"
11. *Мороз А.В.* Властивості та особливості застосування імовірного трипараметричного гамма-розподілу для визначення технічного гідроенергетичного потенціалу малої річки // Відновлена енергетика. – 2014. – №2. – С. 72–78.
12. *Справочник по водным ресурсам* / Под ред. Б.И. Стрельца. – К.: Урожай, 1987. – 304 с.
13. *Яцик А.В., Бишовець Л.Б., Богатов Є.О. та ін.* Малі річки України: Довідник / За ред. А.В. Яцика. – К.: Урожай, 1991. – 296 с.
14. *Ібрагімова М.Р.* Середньозважені значення коефіцієнтів варіації та асиметрії річного стоку води малих річок України для задач малої гідроенергетики // Відновлена енергетика. – 2015. – №1. – С. 48–52.

**XIV МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ЕНЕРГЕТИКА В ПРОМИСЛОВОСТІ-2016**
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ, ЕНЕРГЕТИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ, ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, КАБЕЛІ, ПРОВІДИ,
ПРОМИСЛОВА СВІЛОТЕХНІКА, ГІРНИЧІ МАШИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, КВПІА

**XIV МІЖНАРОДНИЙ ФОРУМ
ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС УКРАЇНИ:
СЬОГОДЕННЯ ТА МАЙБУТНЄ**

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, 02660
Київ, Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"
тел./факс: (044) 201-11-57
e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua
www.tech-expo.com.ua

ОРГАНІЗАТОРИ:
Міністерство енергетики
та вугільної промисловості України
Міжнародний виставковий центр

Технічний партнер: *Planet Media*

**8–10
Листопада**