

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. О. Рубаненко

**ОЦІНЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ
В ЗАДАЧІ ПРОГНОЗУВАННЯ
ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2021

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/675>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>

УДК 621.311.29

Л40

Рекомендовано до друку Вченою Радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 25.11.2021 р.)

Рецензенти:

В. Г. Петрук, доктор технічних наук, професор

В. В. Черкашина, доктор технічних наук, професор

О. А. Ковальчук, кандидат технічних наук

Лежнюк, П. Д.

Л40 Оцінювання деградації фотоелектричних станцій в задачі прогнозування генерування електроенергії : монографія / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, О. О. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 190 с.

ISBN 978-966-641-885-5

В монографії досліджується проблема забезпечення балансової надійності електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії та задачі, що пов'язані з її реалізацією. Розглянуто основні технології прогнозування погодинного балансу електроенергії на наступний день. Досліджено вплив на точність прогнозування графіка генерування електроенергії фотоелектричними станціями метеорологічних параметрів та реального їх технічного стану.

УДК 621.311.29

ISBN 978-966-641-885-5

© П. Лежнюк, В. Комар, О. Рубаненко, 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВДЕ В УКРАЇНІ І СВІТІ ТА ЇХ ВЗАЄМОВПЛИВ З ЕЕС.....	10
1.1 Особливості функціонування ВДЕ в сучасних умовах.....	10
1.2 Тенденції до зміни встановленої потужності та обсягів генерування електроенергії ВДЕ в умовах реалізації стратегії декарбонізації.....	13
Висновки до розділу 1.....	21
2. БАЛАНСУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЕС З ВДЕ.....	22
2.1 Забезпечення балансової надійності ЕЕС з ВДЕ та проблеми, що пов'язані з їх реалізацією.....	22
2.1.1 Основні технології забезпечення балансу електроенергії в ЕЕС з ВДЕ.....	22
2.1.2 Відповідальність виробників ВДЕ за небаланси.....	26
2.2 Задача оптимального керування параметрами електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії.....	28
2.3 Вплив стану електричних мереж на енергоефективність ВДЕ.....	30
Висновки до розділу 2.....	33
3 ВПЛИВ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ВДЕ.....	35
3.1 Математичне моделювання впливу метеорологічних факторів на генерування електроенергії ВДЕ.....	35
3.1.1 Використання часових рядів для представлення генерування ВДЕ.....	35
3.1.2 Кореляційний аналіз генерування ВДЕ.....	44

3.2 Аналіз вхідних даних для прогнозування генерування ВДЕ.....	49
3.2.1 Частотний аналіз вхідних даних для прогнозування генерування ВДЕ.....	49
3.2.2 Вейвлет аналіз генерування електроенергії ВДЕ.....	51
3.2.3 Скалограма і скейлограма вейвлет аналізу часового ряду генерування електроенергії ВДЕ.....	54
3.3 Прогнозування генерування електроенергії ВДЕ.....	57
3.3.1 Методи прогнозування часових рядів генерування електроенергії ВДЕ.....	57
3.3.2 Оцінка впливу метеорологічних факторів на генерування ВДЕ.....	62
3.4 Формування графіка генерування фотоелектричних станцій.....	65
3.4.1 Визначення генерування електроенергії фотоелектричними станціями.....	65
3.4.2 Аналіз генерування електроенергії фотоелектричною станцією.....	67
3.4.3 Метод оцінки впливу метеорологічних показників на ефективність генерування ФЕС.....	75
3.5 Опис роботи та інтерфейсу програмного комплексу аналізу нерівномірності графіку генерування та впливу метеорологічних факторів.....	90
Висновки до розділу 3.....	96
4 ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ПІД ЧАС ЇХ РОБОТИ В БАЛАНСУЮЧІЙ ГРУПІ.....	
4.1 Моделювання технічного стану ФЕС засобами ФТА.....	98
4.1.1 Побудова дерева відмов для ФЕС.....	98

4.1.2 Використання ФТА для оцінки надійності та вдосконалення під час проєктування.....	101
4.1.3 Кількісна оцінка подій ФТА.....	103
4.1.4 Оцінювання надійності електричної мережі та побудова ФТА.....	108
4.2 Аналіз технічного стану фотоелектричних станцій.....	112
4.2.1 Дерево пошкоджень ФТА ФЕС.....	112
4.2.2 Розроблення дерева пошкоджень фотоелектричного Модуля.....	114
4.2.3 Приклад аналізу пошкоджуваності ФЕМ.....	117
4.2.4 Основні дефекти фотоелектричних модулів, які експлуатуються на ФЕС в ЕЕС.....	120
4.3 Коефіцієнт загального залишкового ресурсу ФЕМ.....	127
4.4 Програмно-апаратний комплекс визначення технічного стану обладнання ФЕС.....	139
4.4.1 Блок-схема програмно-апаратного комплексу визначення технічного стану ФЕС та визначення коефіцієнтів-індикаторів.....	140
4.4.2 Критеріальне моделювання генерування ВДЕ для програмно-апаратного комплексу.....	140
4.4.3 Розробка коефіцієнтів-індикаторів аномальної роботи ФЕМ.....	145
Висновки до розділу 4.....	148
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТОК А. Основні дефекти ФЕМ, які експлуатуються на ФЕС в ЕЕС.....	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

FTA	Fault Tree Analyses (Аналіз дерева пошкоджень)
IRENA	The International Renewable Energy Agency
NREL	<u>National Renewable Energy Laboratory</u>
SAIDI	System Average Interruption Duration Index (Індекс середньої тривалості переривання в роботі системи)
АЕС	Атомна електрична станція
ВДЕ	Відновлювані джерела енергії
ВЕС	Вітрова електрична станція
ГАЕС	Гідроакумуюча електрична станція
ГЕС	Гідроелектростанція
ДРГ	Джерело розподіленого генерування
ЕЕС	Електроенергетична система
ЄС	Європейський Союз
ЛЕП	Лінія електропередачі
МГЕС	Мала гідроелектростанція
НКРЕКП	Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг
ОЕС	Об'єднана енергетична система
ОСП	Оператор системи передачі
ОМ	Оператор електричних мереж
ОПН	Обмежувачі перенапруг
ОСР	Оператор системи розподілу
ПФ	Перетворення Фур'є
РЕМ	Розподільні електричні мережі
ТЕС	Теплова електрична станція
ФЕМ	Фотоелектричний модуль
ФЕС	Фотоелектрична станція
ЧР	Часовий ряд

ВСТУП

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) в розподільних електричних мережах вже є невід'ємним елементом електроенергетичних систем (ЕЕС), який задіяний для керування її режимами. Очевидно, що ВДЕ мають оптимально інтегруватися в електричні мережі, нарощуючи потужність генерування та покращуючи техніко-економічні показники електричних мереж, що можливо досягти за рахунок підвищення енергоефективності ВДЕ. В Україні понад 50 % електромереж потребують капремонту, реконструкції та повної заміни через їх значну зношеність та недофінансування робіт з оновлення. Зношеність окремого обладнання енергетичної інфраструктури деяких операторів систем розподілу (ОСР) досягає 70 %. За умов зростання кількості та потужності ВДЕ, приєднаних до зношених розподільних мереж, призводить до зростання пошкоджуваності обладнання цих мереж, що, в свою чергу, призводить також до зменшення енергоефективності ВДЕ. В звітах про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) за останні роки зазначено, що технічний стан інфраструктури галузі наближається до критичного через високий ступінь зношеності обладнання, застарілість технологій, відсутність достатнього рівня інвестицій. На більшості електричних станцій технічний ресурс обладнання вже вичерпано і воно експлуатується понад парковий термін експлуатації. Так, наприклад, із 75 енергоблоків генеруючих компаній теплових електростанцій 68 енергоблоків (16962 МВт або 78,7 %) експлуатується понад парковий термін експлуатації, 2 енергоблоки (600 МВт або 2,8 %) експлуатується понад граничний термін експлуатації і 5 енергоблоків (4000 МВт або 18,6 %) експлуатується понад проектний термін експлуатації. При цьому у 2018 році було виведено із експлуатації 8 енергоблоків. Також в звіті за 2019 р. наголошено, що порівняно з країнами ЄС показники SAIDI і SAIFI в Україні є значно вищими, що зумовлено високим рівнем зносу електричних мереж в Україні. Тому актуальною є задача підвищення енергоефективності ВДЕ для, по-перше, заміни генеруючих потужностей, що використовують органічні види палива, на станції, що використовують

відновлювальні види енергії, а по-друге, сприяння забезпечення надійного електропостачання споживачів.

Збільшення потужностей ВДЕ, зокрема фотоелектричних і вітрових електростанцій (ФЕС і ВЕС), малих гідроелектростанцій (МГЕС) впливає на процес балансування режимів ЕЕС, що, в свою чергу, через їх нестабільність генерування створює суттєві проблеми. Залежність від метеорологічних умов ФЕС, ВЕС та МГЕС потребує значного резервування потужностей, наразі це можливо лише завдяки ТЕС і ГЕС. Балансування Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України забезпечується за рахунок ГЕС/ГАЕС та ТЕС. При потужності ВДЕ більше 3000 МВт, подальше балансування без розвантаження атомних електричних станцій (АЕС) неможливе, по-іншому приходиться обмежувати потужність ВДЕ, що практикується зараз. Тому актуальною є задача підвищення енергоефективності ВДЕ в балансі електроенергії в ЕЕС, а особливо це стосується ВЕС і ФЕС, які мають нерівномірний графік генерування.

На сьогодні енергосистема найбільше потребує швидкодіючих резервів первинного та автоматичного вторинного регулювання, зокрема – високоманевреного генерування з швидким стартом/зупинкою і широким діапазоном регулювання потужності. Так, за даними НЕК «Укренерго», потреба в додатковій маневреній потужності оцінюється в 500 МВт уже в поточному році і до 2,5 ГВт – протягом наступних п'яти років. Цей обсяг може бути отриманий або шляхом розширення діапазону регулювання існуючих енергоблоків, або введенням в експлуатацію нового високоманевреного генерування.

ВДЕ як і всі електростанції планують погодинний графік вироблення електроенергії на наступну добу, який передається Гарантованому покупцеві для балансування потужності та електроенергії в ОЕС України. ВДЕ, щоб не отримувати штрафних санкцій, мають прогнозувати погодинний графік генерування на наступну добу з допустимою точністю. На похибку в прогнозуванні, в першу чергу, впливає неточність прогнозу погодних умов на наступну доба, а також технічний стан ВДЕ. Для ФЕС технічна готовність щодо виконання заявленого графіка генерування визначається технічним станом фотоелектричних модулів (ФЕМ). Це вимагає дослідження впливу на

вироблення електроенергії ФЕМ окремих їх дефектів, як заводських, так і експлуатаційних.

У першому розділі показано особливості функціонування ВДЕ в Україні і світі та їх взаємовплив з ЕЕС, проведено аналіз тенденцій зміни встановленої потужності та обсягів генерування електроенергії ВДЕ з нерівномірним графіком генерування. Показано як зміни встановленої потужності та обсягів генерування електроенергії ВДЕ впливають на умови реалізації стратегії декарбонізації. На основі проведеного аналізу визначено основні наукові, методичні, технологічні й організаційні проблеми, вирішення яких є необхідним для підвищення енергоефективності ВДЕ в балансі електроенергії в ЕЕС.

Другий розділ посвячено забезпеченню балансової надійності ЕЕС з ВДЕ та проблеми, що пов'язані з їх реалізацією. Розглянуто основні технології забезпечення балансу електроенергії в ЕЕС з ВДЕ та відповідальність виробників ВДЕ за небаланси. Сформульована задача оптимального керування параметрами електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії. Показано вплив стану електричних мереж на енергоефективність ВДЕ.

У третьому розділі подано основні методи аналізу генерування ВДЕ та впливу основних метеорологічних факторів. Зокрема проведено аналіз генерування ВДЕ дахових та наземних ФЕС, ВЕС та малих ГЕС. Для визначення найбільш впливових метеорологічних факторів на генерування ВДЕ сформовано базу даних значень генерування ВДЕ та різноманітних метеорологічних факторів.

У четвертому розділі для вирішення завдання підвищення енергоефективності ВДЕ в процесі балансування режиму ЕЕС розроблено дерево пошкоджень ФЕС та її основного елемента фотоелектричного модуля. Дослідження проводились для ФЕС, розташованої на даху електротехнічного факультету Західно-Чеського університету (ЗЧУ), яка введена в експлуатацію в 2005 році, на ФЕС, розташованій на даху факультету електроенергетики та електромеханіки ВНТУ, та на наземних ФЕС, що експлуатуються в Україні. Встановлена можливість використання теорії побудови дерева пошкоджень (Fault Tree Analyses) для аналізу технічного стану ВДЕ.

1 ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВДЕ В УКРАЇНІ І СВІТІ ТА ЇХ ВЗАЄМОВПЛИВ З ЕЕС

1.1 Особливості функціонування ВДЕ в сучасних умовах

За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA – міжурядової організації, яка підтримує країни в їх переході до сталого енергетичного майбутнього і досліджує всі типи відновлюваних джерел енергії, включаючи біоенергетику, геотермальну, гідравлічну, океанічну, сонячну та вітрову енергію, для досягнення сталого розвитку, доступу до електроенергії, енергетичної безпеки та використання безвуглецевих технологій генерування електроенергії) зазначено швидкі темпи нарощування встановленої потужності відновлюваних джерел енергії [1], в тому числі і ВДЕ з нерівномірним графіком генерування. В нормативному документі СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014 «Норми технологічного проектування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище» під електростанцією негарантованої потужності розуміють електростанцію, яка використовує нестабільний природний енергоресурс, в результаті чого вона має обмежену можливість або зовсім не має можливості регулювати свою потужність у відповідності із заданим добовим графіком [2], тобто має природно нерівномірний графік генерування.

У вимогах до вітрових (ВЕС) та фотоелектричних станцій (ФЕС) при їхній роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою (ОЕС) України зазначено, що ВЕС та ФЕС прийнято вважати електростанціями з природно нерівномірним графіком генерування електроенергії за певних погодних умов, тобто існує можливість припинення видавання ними активної потужності в мережу для ВЕС при швидкості вітру менше 3–5 м/с, а для ФЕС при сонячній радіації менше 200 Вт/м² [3].

В статті [4] автор згадує про нерівномірність графіку генерування ВЕС і ФЕС, що зумовлена природними умовами, а також наголошує на ролі ВДЕ в балансі електроенергії ЕЕС. Зокрема, в статті [4] зазначено, що з метою декарбонізації, тобто зменшення викидів усіх видів парникових газів від спалювання викопного палива, в першу чергу вугілля, при виробництві теплової та електричної енергії, що становлять близько 40 % загального обсягу світових викидів просувалась ідея тотального домінування відновлюваних джерел електроенергії

над традиційною енергетикою. Але на думку автора це призводить до руйнування надійних енергетичних систем. Також, поняття ВДЕ з нерівномірним графіком генерування, як джерела живлення, використовується в зарубіжній науковій статті [5], в якій автор наголошує, що розвиток (ВДЕ) значно впливає на традиційне генерування, особливо на забезпечення надійності та статичної стійкості системи. Причину в цьому вбачає в живленні від генераторів перервної потужності, що вимагає постійно ввімкненої резервної потужності в мережу, яка не перевищує 20 %. Аналіз літературних джерел дозволив сформулювати основні особливості функціонування електричних мереж в сучасних умовах, що впливають на енергоефективність ВДЕ в Україні (рис. 1.1) [6–10].

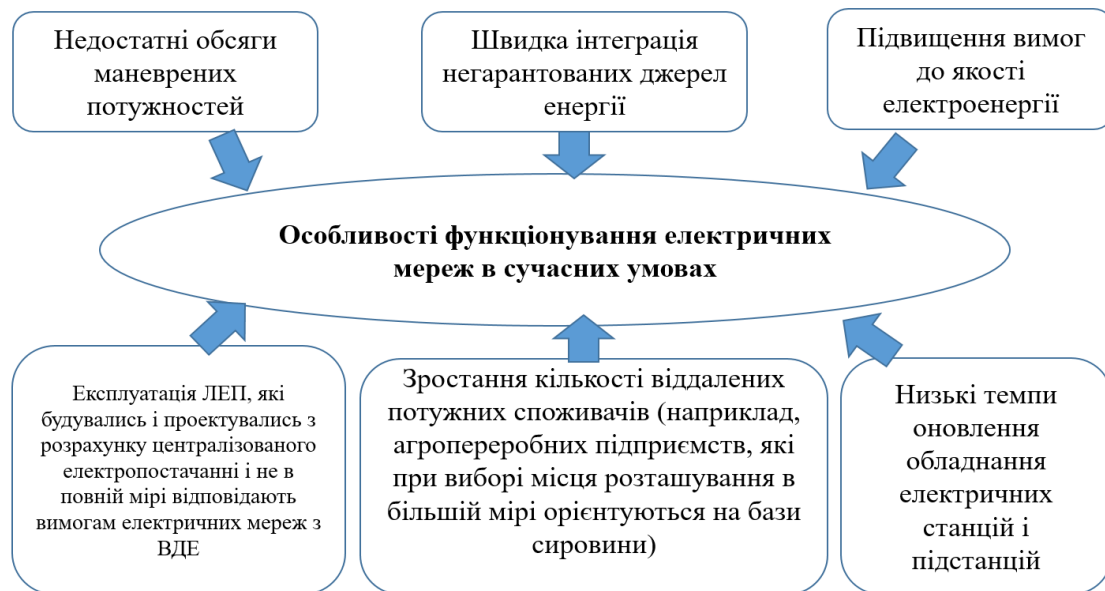


Рисунок 1.1 – Особливості функціонування електричних мереж з ВДЕ в сучасних умовах

Оскільки ВДЕ інтегровані в переважній більшості в розподільні електричні мережі (РЕМ), хоча їх експлуатація має вплив на ОЕС в цілому, то розглянуто особливості функціонування РЕМ в сучасних умовах, які впливають на енергоефективність ВДЕ в балансі електроенергії в ЕЕС. Якісне функціонування РЕМ підвищить ефективність використання ВДЕ та інтерес власників ВДЕ до нарощування їх встановленої потужності, тому це питання потребує більш детального дослідження [11]. Зокрема в [9] зазначено, що швидке збільшення вста-

новленої потужності ВДЕ обумовлює проблеми розподіленого енергопостачання та розвитку електромереж. Врахування типу джерела живлення, рівня напруги, графіку споживання дасть змогу досягти максимальних результатів при коригування енергетичної стратегії та розвитку енергетики конкретного регіону чи міста.

Робочий стан електромереж є важливою умовою для реалізації ефективного використання ВДЕ, що зумовлює інтерес до адаптації розподільної мережі до нових просьюмерів, тому більш ретельно почали контролюватись показники надійності, коефіцієнт навантаження, струм короткого замикання, якість електроенергії [12]. Наразі 50 % обладнання електричних мереж потрібно оновити чи відремонтувати, а у окремих операторів системи розподілу зношеність обладнання електричних мереж сягає 70 % [13]. В статті [8] проаналізовані основні характеристики функціонування РЕМ України, які негативно впливають на розвиток ВДЕ, зокрема на залучення іноземних інвестицій (див. рис. 1.2).

Екологічні проблеми пов'язані з видобуванням викопного палива, зменшення запасів викопних енергоносіїв, перевантаження електричних мереж низької напруги та погіршення показників їх якості функціонування є мотивацією інтегрування джерел (малих генерувальних потужностей) розподіленого генерування (ДРГ) та перетворення існуючої електроенергетичної системи в реструктуризовану. Тобто, йдеться про створення локальних електричних систем і мікроелектромереж, які б сприяли підвищенню енергоефективності ВДЕ під час їх експлуатації [9].

Оптимізація режимів роботи таких мереж, які виникають внаслідок швидкого інтегрування ВДЕ, є викликом для операторів електричних мереж (ОМ). Наразі гостро стоїть проблема якості електроенергії. Якість електроенергії є дуже важливою характеристикою систем з ВДЕ. Сьогодні споживачі є більш чутливими до збурень в мережі. Хаотичне інтегрування ВДЕ та нелінійність навантаження більшості потужних споживачів є поширеним явищем в РЕМ, що негативно впливають на енергоефективність ВДЕ з природно нерівномірним графіком генерування електроенергії [14].



Рисунок 1.2 – Негативні характерні ознаки розподільних електричних мереж України що зменшують енергоефективність ВДЕ

На особливості якості функціонування електричних мереж з ВДЕ в сучасних умовах впливає також тип ВДЕ та його режими роботи [9]. Тому для формування стратегії підвищення енергоефективності ВДЕ в балансі електроенергії ЕЕС потрібно дослідити тенденції зміни встановленої потужності ВДЕ та обсягів генерування електроенергії ними [15].

1.2 Тенденції до зміни встановленої потужності та обсягів генерування електроенергії ВДЕ в умовах реалізації стратегії декарбонізації

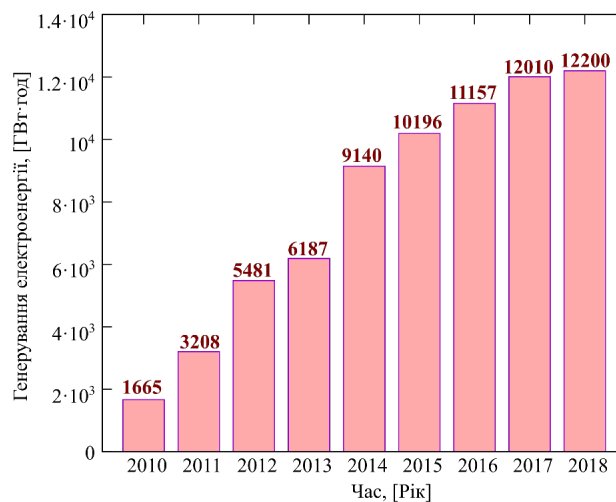
З часів індустріальної революції більшість країн світу все ще залежні від викопних видів палива. Ця залежність спричиняє серйозні наслідки для клімату, а також для здоров'я людини. Три чверті глобальних викидів парникових газів є результатом спалення викопного палива для генерування електроенергії. Також, використання викопного палива призводить до забруднення повітря і щороку призводить до щонайменше 5 мільйонів передчасних смертей [16]. Зокрема в [16] зазначено, щоб зменшити викиди CO_2 та забруднення повітря, світ повинен швидко перейти до низьковуглецевих джерел енергії – ядерних та відновлюваних технологій. Найпопулярнішими ВДЕ є: сонячна енергія, енергія вітру, гідроенергія, енергія припливів, геотермальна енергія, енергія біомаси.

Стати першим у світі кліматично нейтральним континентом до 2050 року є метою Європейської енергетичної стратегії зеленого кур-

су, найамбітнішого пакету заходів, який повинен дозволити європейським громадянам та бізнесу отримати вигідні умови для реалізації стратегії сталого розвитку. Використання відновлюваної енергії має багато потенційних переваг, включаючи зменшення викидів парникових газів, диверсифікацію енергопостачання та зменшення залежності від вартості викопного палива (зокрема, нафти та газу).

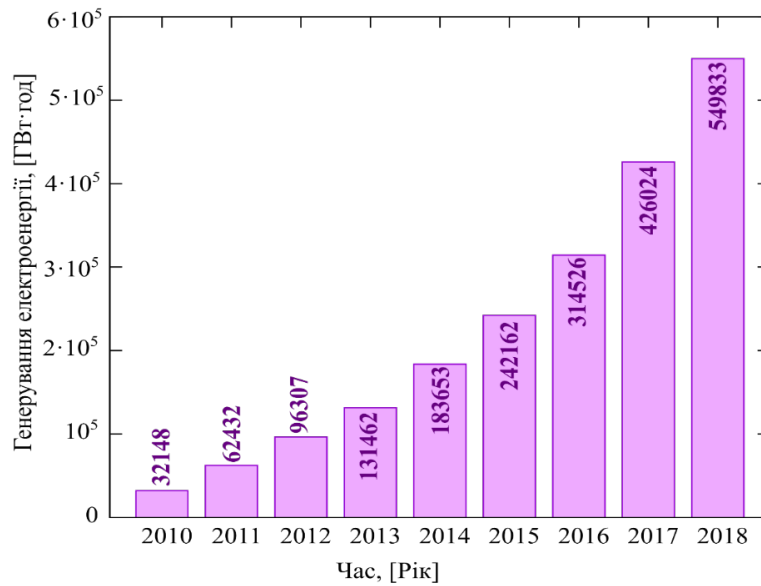
Швидкі темпи будівництва нових об'єктів ВДЕ може також стимулювати зайнятість населення в Європейському Союзі (ЄС) шляхом створення робочих місць у нових «зелених» технологіях. Останні статистичні дані щодо частки енергії з відновлюваних джерел загалом та у трьох секторах споживання (електроспоживання, опалення та охолодження, транспорт) у ЄС подано в [17]. За даними NREL (National Renewable Energy Laboratory) за одну годину на Землю надходить більше енергії сонця, ніж використовується населенням Землі за один рік. Сьогодні використовується енергія сонця по-різному – для обігріву будинків і підприємств, для нагрівання води або генерування електроенергії [18]. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства попит на ВДЕ зростає, незважаючи на негативний вплив ситуації, викликані COVID-19 [19].

За даними IRENA з кожним роком зростає світове генерування електроенергії ВДЕ. Одними з найпопулярніших видів ВДЕ є сонячна та вітрова енергія, про що свідчить світова тенденція збільшення генерування електроенергії ФЕС і ВЕС (рис. 1.3) [1].



а)

Рисунок 1.3 – Тенденція збільшення генерування електроенергії за даними IRENA в світі: а) сонячні термальні станції; б) ФЕС



б)

Рисунок 1.3 – Тенденція збільшення генерування електроенергії за даними IRENA в світі: а) сонячні термальні станції; б) ФЕС (продовження)

В Україні, як і в світі спостерігається десятирічна тенденція стрімкого зростання потужностей відновлюваної енергетики (рис. 1.4) [20].

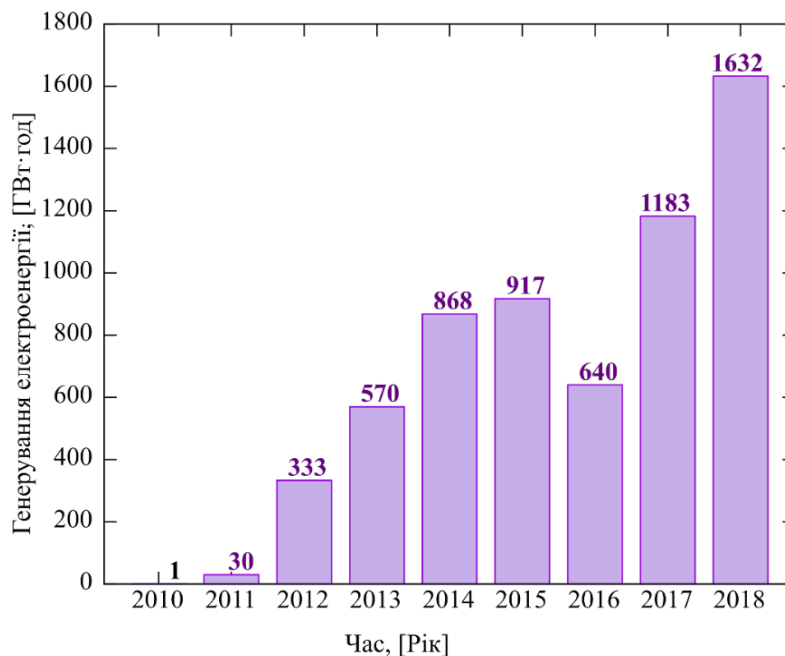


Рисунок 1.4 – Тенденція збільшення генерування електроенергії ФЕС в Україні за даними IRENA

Щорічне світове збільшення на 7,9 % встановленої потужності було забезпечено введенням в експлуатацію ФЕС та ВЕС, частка яких склала 84 % від усіх типів ВДЕ (рис. 1.5).

Загальна потужність виробництва енергії з ВДЕ в світі досягла 2551 ГВт на кінець 2018 року. Спостерігається стабільна тенденція до стрімкого зростання темпів приросту приєднання до електричних мереж ОЕС України об'єктів відновлюваної енергетики. Загальна встановлена потужність об'єктів електроенергетики, що виробляють електричну енергію з альтернативних джерел енергії та яким встановлено «зелений» тариф, в порівнянні з 2017 роком збільшилась на 742,5 МВт (з яких ВЕС – 67,7 МВт, СЕС – 646,4 МВт, біомаса/біогаз – 24,4 МВт, мікро-, міні- та малі гідроелектростанції – 4 МВт) та становить 2117,2 МВт.

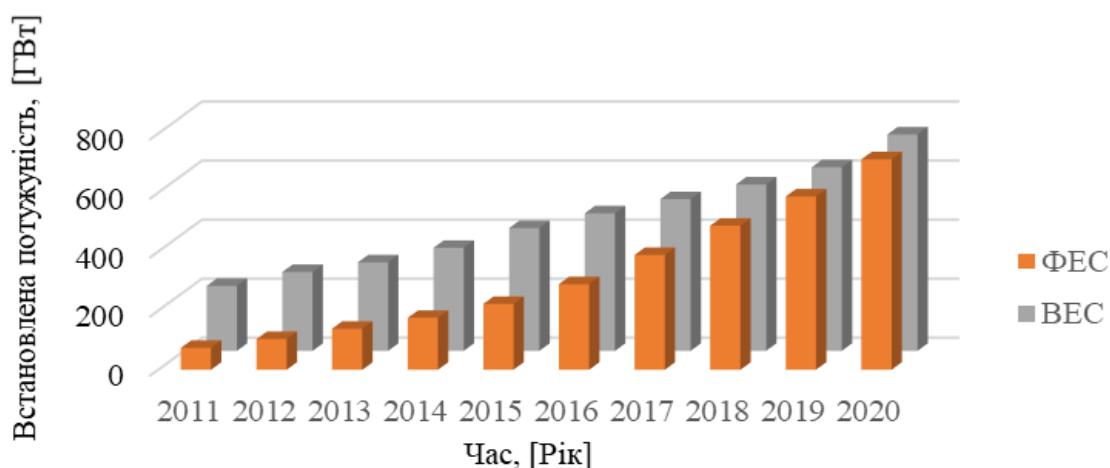


Рисунок 1.5 – Динаміка зміни встановленої потужності ВЕС і ФЕС в світі за даними IRENA

Загальна встановлена потужність генеруючих установок приватних домогосподарств зросла у 3 рази: з 51 МВт станом на кінець 2017 року до 157 МВт наприкінці 2018 року. Встановлена потужність ВДЕ в Україні за даними НЕК «Укренерго» представлена на рис. 1.6.

Виробництво електричної енергії за 2018 рік об'єктами електроенергетики, яким встановлено «зелений» тариф, порівняно з 2017

роком збільшилось на 691 млн. кВт·год або на 33 % та становить 2777,3 млн. кВт·год (що складає 1,9 % від обсягів виробництва електричної енергії електростанціями, які входять до ОЕС України) [20].

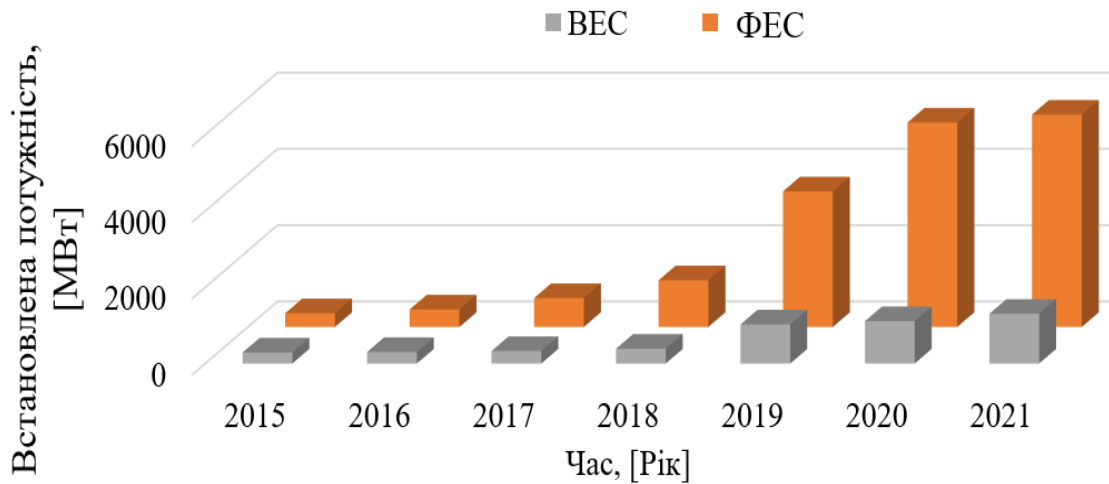


Рисунок 1.6 – Встановлена потужність ВДЕ в Україні за даними НЕК «Укренерго»

Тенденція збільшення встановленої потужності ВДЕ в Україні, які реалізують генеровану потужність за «зеленим» тарифом за даними Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), показана на рис. 1.7. План реалізації стратегії збільшення використання ВДЕ вимагає врахування нових підходів до системи контролю параметрів ВДЕ. За даними НЕК «Укренерго» у 2020 році структура встановленої потужності в енергетичному секторі України змінилася порівняно з 2019 роком таким чином: зросла частка електричних станцій з нерівномірним графіком генерування, тобто ВЕС і ФЕС і склала разом 6473,8 МВт (що на 1893,4 МВт більше ніж у 2019 році). Потужність ТЕС і ТЕЦ склала 21,8 ГВт та 6,1 ГВт та потужність ГЕС і ГАЕС склала 4,8 ГВт та 1,5 ГВт відповідно. Встановлена потужні ГАЕС, ГЕС, ТЕС, ТЕЦ залишається незмінною з 2018 року. Також у 2020 році зросла частина ВЕС та ФЕС у структурі генерування електроенергії майже вдвічі – до 6,8 % (3,3 % у 2019 р.) при загальному обсязі генерування електроенергії 148,9 млрд кВт·год. ГЕС, ГАЕС та ТЕС відіграють

ключову роль у покритті пікового навантаження та компенсації нерівномірності генерування ВЕС і ФЕС, що зменшує їх енергоефективність [21].

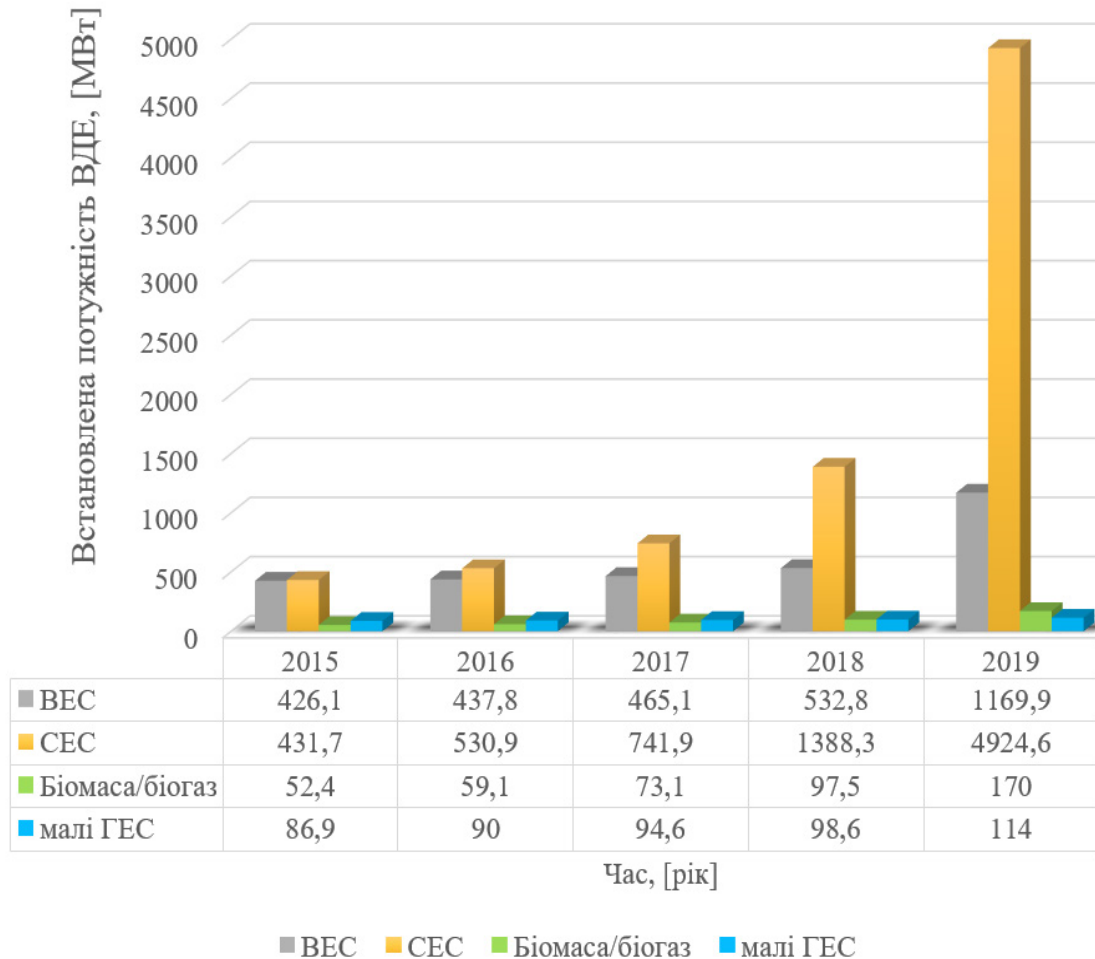


Рисунок 1.7 – Тенденція збільшення встановленої потужності ВДЕ в Україні, які реалізують генеровану потужність за «зеленим» тарифом за даними НКРЕКП

Оскільки малі гідроелектростанції потребують значних інвестицій та особливих природних умов, то ВЕС та ФЕС доступні для більшості [20]. Про системи та концепції керування в електромережах з малими ГЕС та ФЕС проведено багато досліджень, які представлені в роботах [22–27]. Але для електромереж України також актуальні дослідження щодо ВЕС [28]. Обсяги виробництва електроенергії ВЕС в світі, та Україні протягом останніх років показано на рис. 1.8 [1].

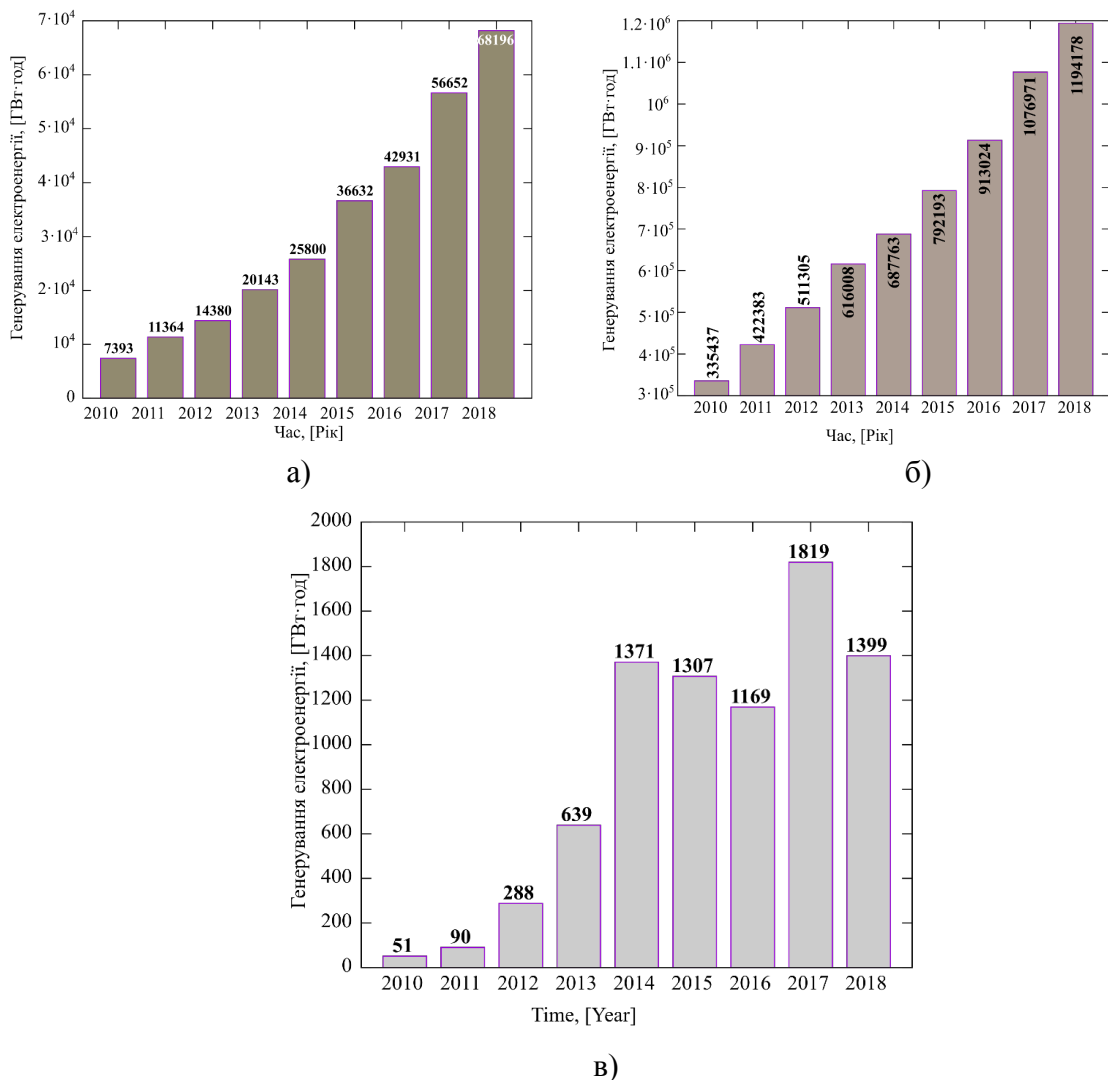


Рисунок 1.8 – Обсяги генерування електроенергії за даними IRENA:
 а) у світі Offshore вітроелектростанціями; б) у світі Onshore вітроелектростанціями [30]; в) обсяг генерування електроенергії ВДЕ в Україні

З рис. 1.5 видно, що найбільша частина ВДЕ є ФЕС і ВЕС, які належать до джерел енергії з нерівномірним графіком генерування, оскільки суттєво залежать від погодних умов. Енергетична система України – одна з найменш гнучких у світі. У ній критично не вистачає маневрових потужностей для компенсації нерівномірності графіків генерування ВЕС і ФЕС. У разі прийняття Україною нових зобов'язань згідно з вимогами Паризької угоди запланованих 20 % ВДЕ у 2035 році стане недостатньо [29]. Використання ГЕС частково допоможе вирішити дану проблему. В найближчі роки вся енергетична база планети зміниться [31, 32]. Екологічні проблеми, які необхідно терміново вирішити для зменшення викидів CO₂, стали потужним

поштовхом для розвитку ВДЕ. До 60 % електроенергії до 2030 року буде вироблятися за рахунок ВДЕ в європейських електромережах.

В найближчі роки вся енергетична база планети зміниться [31, 32]. Екологічні проблеми, які необхідно терміново вирішити для зменшення викидів CO₂, стали потужним поштовхом для розвитку ВДЕ. До 60 % електроенергії до 2030 року буде вироблятися за рахунок ВДЕ в європейських електромережах. Енергетична стратегія країни до 2035 року передбачає, що ВДЕ становитимуть 25 % в енергетичному балансі. Також, прогнозується, що інвестиції у ВДЕ в Європі до 2035 р. будуть більшими ніж інвестиції в ТЕС і АЕС, більше ніж у три рази [33].

В найближчі роки вся енергетична база планети зміниться [31, 32]. Екологічні проблеми, які необхідно терміново вирішити для зменшення викидів CO₂, стали потужним поштовхом для розвитку ВДЕ. До 60 % електроенергії до 2030 року буде вироблятися за рахунок ВДЕ в європейських електромережах. Енергетична стратегія країни до 2035 року передбачає, що ВДЕ становитимуть 25 % в енергетичному балансі. Також, прогнозується, що інвестиції у ВДЕ в Європі до 2035 р. будуть більшими ніж інвестиції в ТЕС і АЕС, більше ніж у три рази [33].

Генерування електроенергії ГЕС є одним із пріоритетних напрямків розвитку ВДЕ. ГЕС – це компромісне рішення, яке задовольняє вимоги до обсягу виробництва електроенергії, якості електроенергії, вартості електроенергії та екології [34]. ГЕС має великий потенційний ресурс – 14576 ТВт·год.

Встановлена потужність ГЕС є меншою, ніж потенційний ресурс ГЕС (рис. 1.9а) [35, 36].

За даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії, у світі спостерігається постійне збільшення встановленої потужності ГЕС, як показано на рис. 1.9а). В Україні також зберігається тенденція збільшення встановленої потужності ГЕС, як показано на рис. 1.9б).

Варто зазначити, що низький технічний стан ліній електропередачі та нерівномірність графіку генерування електроенергії ФЕС та ВЕС спричиняють негативні ситуації для споживача.

Ці ситуації зумовлюють можливі режими часткового живлення деяких споживачів мережі. Для зменшення дефіциту електроенергії пропонується використання для відновлення постачання електроенергії споживачам енергомереж спільне використання різних джерел енергії, зокрема міні-ГЕС.

Наукове видання

**Лежнюк Петро Дем'янович
Комар В'ячеслав Олександрович
Рубаненко Олена Олександрівна**

**ОЦІНЮВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ
В ЗАДАЧІ ПРОГНОЗУВАННЯ
ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

Монографія

Видання здійснене в авторській редакції

Підписано до друку 10.12.2021 Формат
29,7×42¼. Папір офсетний. Гарнітура
Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 10,90.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75)
Зам № В2021-08

Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
press.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.

Замовити цю книгу <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/675>

Видавництво Вінницького національного технічного університету

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog>