

Дана заявка претендує на пріоритет за попередньою заявкою США № 63/013,864, яка подана 22 квітня 2020 р., та названа "Porous Materials For Battery Electrodes" ("Пористі матеріали для електродів батареї"), повний зміст якої включений у даний документ за допомогою посилання для будь-яких цілей.

РІВЕНЬ ТЕХНІКИ

Технології зберігання енергії відіграють надзвичайно важливу роль в електромережах; на самому базовому рівні дані накопичувачі енергії забезпечують згладжування для кращої відповідності вироблення та вимоги до мережі. Послуги, що надані пристроями зберігання енергії, є вигідними для електромереж у різних часових масштабах, від мілісекунд до років. У цей час існують технології зберігання енергії, які можуть підтримувати в масштабі часу від мілісекунд до годин, але існує потреба в системах тривалого та надтривалого зберігання енергії (у сукупності щонайменше ≥ 8 годин). Даний розділ "Рівень техніки" призначений для ознайомлення з різними аспектами даної області техніки, які пов'язані з варіантами реалізації даних винаходів. Таким чином, попереднє обговорення у даному розділі призначене для кращого розуміння даних винаходів і не повинно розглядатися як визнання відомого рівня техніки.

РОЗКРИТТЯ СУТНОСТІ ВИНАХОДУ

Системи та способи різних варіантів реалізації можуть забезпечувати пористі матеріали для електродів електрохімічних систем зберігання енергії.

Різні варіанти реалізації можуть включати в себе батарею, що містить: позитивний електрод, електроліт і негативний електрод, причому негативний електрод містить пористий метал. У різних варіантах реалізації пористий метал може бути виготовлений щонайменше частково з використанням щонайменше одного летучого пороутворювача. У різних варіантах реалізації пористий метал містить залізо. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач являє собою відновлювач. У різних варіантах реалізації відновлювач містить вуглець. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач містить сульфат заліза (II), сульфат заліза (II, II), макінавіт, марказит, пірит, троїліт, піротин, грейгіт, аморфний сульфід заліза (II) або сульфід свинцю. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач містить вугілля. У різних варіантах реалізації пористий метал одержаний шляхом відновлення у подовій печі. У різних варіантах реалізації подова піч являє собою піч з обертовим подом або піч з лінійним подом. У різних варіантах реалізації пористий метал одержаний шляхом відновлення в обертовій сушильній печі. У різних варіантах реалізації утворення пор у пористому металі відбувається шляхом електрохімічного відновлення у батареї. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач містить діоксид кремнію, силікат натрію, оксид натрію, оксид кальцію або оксид магнію. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач містить сіль електроліту. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач містить гідроксид калію або натрію. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач містить нітрат амонію або сульфат калію. У різних варіантах реалізації пористий метал утворений з матеріалу-попередника, що має перший розмір, причому розмір частинок летучого пороутворювача приблизно такий самий, як і перший розмір. У різних варіантах реалізації пористий метал має шар продукту розряду на своїй поверхні, причому розмір частинок летучого пороутворювача перевищує у два рази товщину шару продукту розряду. У різних варіантах реалізації щонайменше один летучий пороутворювач містить щонайменше два різних летучих пороутворювача. У різних варіантах реалізації два різних летучих пороутворювача являють собою пороутворювачі різного типу та/або пороутворювачі різного розміру. У різних варіантах реалізації додатково містить струмознімач, що металургійно зв'язаний або має електричний зв'язок з негативним електродом, причому струмознімач розташований вздовж щонайменше частини негативного електрода. У різних варіантах реалізації позитивний електрод містить катод, що споживає для своєї роботи повітря, електрод з оксигідроксиду нікелю або електрод з діоксиду марганцю. У різних варіантах реалізації залізо містить сталеплавильний пил, прокатну окалину, залізну руду, залізну сітку, залізний дріт, залізний порошок або будь-яку їхню комбінацію. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач містить кокс. У різних варіантах реалізації пористий метал може бути виготовлений щонайменше частково з використанням пороутворювача, що містить карбонат металу. Різні варіанти реалізації можуть включати в себе способи утворення пористого металу для негативного електрода батареї, що включають використання щонайменше одного летучого пороутворювача для утворення пор у пористому металі. У різних варіантах реалізації пори летучого пороутворювача можуть бути утворені на етапі відновлення або без нього.

КОРОТКИЙ ОПИС КРЕСЛЕНЬ

ФІГ. 1 являє собою схему частини електрохімічної комірки згідно з різними варіантами реалізації.

ФІГ. 2 являє собою технологічну блок-схему, що ілюструє спосіб утворення пористого металу для негативного електрода.

ФІГ. 3-11 ілюструють різні наведені в якості прикладу системи, в яких один або більше аспектів різних варіантів реалізації можуть бути використані як частина великомасштабних систем зберігання енергії.

ЗДІЙСНЕННЯ ВИНАХОДУ

Посилання на конкретні приклади та реалізації винаходу призначені для ілюстративних цілей та не призначені для обмеження обсягу формули винаходу. Наступний нижче опис варіантів реалізації винаходу не призначений для обмеження винаходу даними варіантами реалізації, а скоріше для того, щоб дати можливість фахівцю у даній області техніки створювати та застосовувати даний винахід.

Наступні нижче приклади наведені як ілюстрація різних варіантів реалізації даних систем і способів даного винаходу. Дані приклади є ілюстративними, можливо передбачуваними, і не повинні розглядатися як обмежуючі, та не обмежують іншим способом обсяг даного винаходу.

Різні варіанти реалізації будуть докладно описані з посиланням на прикладні графічні матеріали. Скрізь, де це можливо, у графічних матеріалах для позначення однакових або подібних частин використані одні і ті самі посилальні позиції. Посилання на конкретні приклади та реалізації винаходу призначені для ілюстративних цілей та не призначені для обмеження обсягу формули винаходу. Наступний нижче опис варіантів реалізації винаходу не призначений для обмеження винаходу даними варіантами реалізації, а скоріше для того, щоб дати можливість фахівцю в даній області техніки створювати та застосовувати даний винахід. Якщо не зазначено інше, прикладні

графічні матеріали не виконані в масштабі.

У даному документі, якщо не зазначено інше, кімнатна температура становить 25 °C, а стандартні температура та тиск становлять 25 °C і 1 атмосферу. Якщо явно не зазначено інше, всі вимірювання, результати вимірювань, фізичні властивості та значення, які залежать від температури, тиску або і того, й іншого, наведені при стандартній температурі та тиску навколишнього середовища.

Як правило, якщо не зазначено інше, термін "приблизно", використовуваний у даному документі, призначений для охоплення відхилення або діапазону $\pm 10\%$, експериментальної або інструментальної помилки, що пов'язана з одержанням заявленого значення, і переважно більшої з них.

У даному документі, якщо не зазначено інше, перерахування діапазонів значень у даному документі призначене винятково для використання в якості скороченого методу індивідуального посилання на кожне окреме значення, що попадає у діапазон. У даному документі, якщо не зазначено інше, кожне окреме значення в межах діапазону включене в специфікацію, як яби воно було зазначене у даному документі окремо.

Наступні нижче приклади наведені як ілюстрація різних варіантів реалізації даних систем і способів даного винаходу. Дані приклади є ілюстративними, можливо передбачуваними, і не повинні розглядатися як обмежуючі, та не обмежують іншим способом обсяг даного винаходу.

Слід зазначити, немає необхідності надавати або розглядати теорію, що лежить в основі нових й інноваційних процесів, матеріалів, робочих параметрів або інших корисних характеристик і властивостей, які є предметом або пов'язані з варіантами реалізації даного винаходу. Проте, для подальшого розвитку даної області техніки у даному документі представлені різні теорії. Теорії, висунуті у даному документі, й якщо явно не зазначено інше, жодним чином не обмежують, скорочують або звужують обсяг домагань, передбачених заявленими винаходами. У цих теоріях немає необхідності, та дані теорії не використовують на практиці для застосування даного винаходу. Крім того, слід розуміти, що дані винаходи можуть призвести до нових і раніше невідомих теорій, що пояснюють функціональні особливості варіантів реалізації способів, виробів, матеріалів, пристроїв і систем згідно з даним винаходом; і такі пізніше розроблені теорії не повинні обмежувати обсяг домагань, передбачених даними винаходами.

Різні варіанти реалізації систем, обладнання, технологій, способів, дій та робіт, що викладені у даному документі, застосовні для різних інших дій та в інших областях на додаток до тих, які викладені у даному документі. Крім того, дані варіанти реалізації винаходу, наприклад, застосовні: іншим обладнанням або видами діяльності, які можна розробити у майбутньому; і з існуючим обладнанням або діями, які можна частково змінити на основі положень даного опису. Крім того, різні варіанти реалізації винаходу та приклади, викладені у даному документі, застосовні один з одним, повністю або частково, та в різних і різноманітних комбінаціях. Таким чином, наприклад, конфігурації, представлені у різних варіантах реалізації даного опису, можуть бути використані один з одним; й обсяг домагань, передбачених даними винаходами, не повинен обмежуватися конкретним варіантом реалізації, конфігурацією або компонуванням, які викладені у конкретному варіанті реалізації, прикладі або у варіанті реалізації на конкретній фігурі.

Варіанти реалізації даного винаходу включають в себе пристрої, системи та способи для тривалого та надтривалого, низьковитратного зберігання енергії. У даному документі термін "тривалий" та/або "надтривалий" може відноситися до періодів зберігання енергії протягом 8 годин або більше, таких як періоди зберігання енергії протягом 8 годин, періоди зберігання енергії від 8 годин до 20 годин, періоди зберігання енергії протягом 20 годин, періоди зберігання енергії від 20 годин до 24 годин, періоди зберігання енергії протягом 24 годин, періоди зберігання енергії від 24 годин до тижня, періоди зберігання енергії від тижня до року (наприклад, від декількох днів до декількох тижнів і до декількох місяців) і т.д. Інакше кажучи, "тривалий" та/або "надтривалий" комірki зберігання енергії можуть відноситися до електрохімічних комірок, які можна сконфігурувати для зберігання енергії протягом декількох днів, тижнів або сезонів. Наприклад, електрохімічні комірki можна сконфігурувати для зберігання енергії, вироблюваної сонячними елементами в літні місяці, коли багато сонячного світла, а вироблення сонячної енергії перевищує потреби електромережі, і виділення накопиченої енергії в зимові місяці, коли сонячного світла недостатньо для задоволення вимог електромережі.

ФІГ. 1 являє собою схему частин електрохімічної комірки, такої як батарея 100, відповідно до різних варіантів реалізації. Батарея 100 може включати в себе позитивний електрод 102, електроліт 106 і негативний електрод 104. У різних варіантах реалізації негативний електрод 104 може містити струмознімач 108. В якості конкретних прикладів, батарея 100, позитивний електрод 102, електроліт 106, негативний електрод 104 і/або струмознімач 108 можуть являти собою будь-яку батарею, позитивний електрод, електроліт, негативний електрод і/або струмознімач, описані у публікації заявки на патент США № 2020/0036002, публікації заявки на патент США № 2021/0028452 і/або публікації заявки на патент США № 2021/0028457, повний зміст всіх трьох з них включений у даний документ за допомогою посилання для будь-яких цілей. Одна або більше батарей 100 можуть бути з'єднані разом у системі зберігання енергії, такий як система тривалого зберігання енергії, система надтривалого зберігання енергії та т.д.

У різних варіантах реалізації електроліт 106 може являти собою будь-який електроліт, відомий в даній області техніки, такий як будь-який електроліт, придатний для залізних лужних батарей. У різних варіантах реалізації негативний електрод 104 може бути утворений з пористого металу, такого як пористе залізо, та/або містити його. У різних варіантах реалізації негативний електрод 104 може являти собою лужний електрод, такий як лужний залізний електрод.

Струмознімач 108 може являти собою сітку або іншу пористу поверхню, вбудовану в матеріал, що використовується у технологічному процесі для утворення негативного електрода 104, такому як процес відновлення, що описаний у даному документі. Струмознімач 108 може являти собою залізну пластину. Струмознімач 108 може бути металургійно зв'язаний або мати електричний зв'язок з електродом 104 за допомогою механічного тиску. Електрод 104 може бути настільки провідним, що йому не потрібне струмознімання за всією його довжиною, а, скоріше, потрібне тільки струмознімання на язичках у верхній частині електрода 104. В

якості альтернативи, електрод 104 може бути настільки пористим, що його провідність стає досить поганою, і необхідне струмознімання за всю площу електрода.

Позитивний електрод 102 також може називатися протиелекродом, а протиелекродами для такого анода (або позитивного електрода 102) можуть бути будь-які протиелектроди, відомі в даній області техніки, такі як будь-які протиелектроди для лужних залізних батарей, включаючи, без обмеження, катода, що містять шар для проходження повітря, електроди з оксигідроксиду нікелю й електроди з діоксиду марганцю.

Враховуючи велику зміну обсягу між продуктами заряду та розряду, одержаними під час електрохімічного циклу лужного залізного електрода, такого як негативний електрод 104, пористість може бути ключовою метрикою, що визначає ємність, одержувану від залізного електрода. Тому для забезпечення високої продуктивності, низьковитратних залізних батарей цікаві способи забезпечення високопористих, низьковитратних залізних електродів.

Не обмежуючись якою-небудь конкретною теорією або моделлю реакційної здатності залізного електрода, такого як негативний електрод 104, можливі схеми окиснення залізного електрода, такого як негативний електрод 104, у лужному електроліті, такому як електроліт 106, можуть здійснюватися у відповідності з наступними двома етапами реакції: реакція 1 та реакція 2, показаними нижче в таблиці 1. Можливі додаткові або різні продукти реакції (один із яких описаний в реакції 3 нижче в таблиці 1), але характеристика зміни обсягу в ході реакції є загальною для будь-якого продукту окиснення щодо металевого заліза.

Таблиця 1

Реакція 1:	$\text{Fe} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{e}^-$	$E^0 = -0,88 \text{ V}$
відносно стандартного водневого електрода (SHE)		
Реакція 2:	$3\text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$E^0 = -0,76 \text{ V}$
відносно стандартного водневого електрода (SHE)		
Реакція 3:	$\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{FeOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$	$E^0 = -0,61 \text{ V}$
відносно стандартного водневого електрода (SHE)		

У таблиці 2 наведені деякі основні фізичні властивості вибраних продуктів заряду та розряду в лужному залізному електроді, такому як негативний електрод 104.

Таблиця 2

Характеристика	Fe	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Fe_3O_4
Молярна маса (г/моль)	55,9	89,9	231,5
Щільність (г/куб.см)	7,87	3,40	5,17
Молярний об'єм (куб.см/моль)	7,1	26,4	44,8
Об'єм на моль Fe (куб.см/моль)	7,09	26,43	14,93
Відношення Пілінга-Бедворта	-	3,73	2,10
Теоретична питома ємність - постійна (мАгод/гFe)	-	959,76	1279,68
Теоретична питома ємність - запас (мАгод/гFe)	-	959,76	319,92

Відношення Пілінга-Бедворта являє собою відношення об'єму елементарної комірки оксиду металу до об'єму елементарної комірки відповідного металу (з якого створюється оксид) й являє собою міру чистої зміни об'єму за один етап реакції.

Матеріали на основі заліза, що мають підвищену пористість, можуть бути виготовлені з використанням методів обробки матеріалів на основі твердих частинок. Одним із методів введення пористості при обробці матеріалів на основі твердих частинок є введення летучої фази. Згідно з одним аспектом у залізних матеріалах, одержаних з використанням процесу з обертовим або лінійним подом (RHF або LHF, відповідно), зазвичай використовують відновлювачі на основі вугілля, які також діють в якості летучих пороутворювачів. Матеріали, одержані згідно з цими процесами, можуть мати переважні властивості при використанні у залізному електроді для акумуляторної батареї (батарея також може називатися у даному документі електрохімічною коміркою), такому як негативний електрод 104. Також описані інші способи введення летучих фаз й утворення матеріалів на основі заліза за допомогою низьковитратних методів відновлення. У деяких випадках матеріал на основі заліза може бути електрохімічно відновлений всередині вузла батареї (наприклад, батареї 100), а не термохімічно відновлений на етапі обробки перед введенням у батарею (наприклад, батарею 100). У різних варіантах реалізації залізний електрод батареї (або електрохімічної комірки), такий як батарея 100, являє собою негативний електрод батареї (або електрохімічної комірки), такий як негативний електрод 104.

Різні варіанти реалізації можуть відноситися до геометрії матеріалу, що вводиться, до процесу відновлення та способів створення геометрії. Матеріали на основі заліза для лужних батарей, таких як батарея 100, можуть приймати різні форми, деякі з яких описані нижче разом з перевагами та недоліками, що підходять для різних форм.

Матеріали на основі заліза для введення у процес відновлення можуть бути одержані при дуже низькій вартості з котунів-попередників заліза. Такі котуни-попередники заліза можуть, наприклад, бути утворені методами, використовуваними для виробництва оксидних котунів для доменних печей і оксидних котунів для

прямого відновлення. Під час процесу окочування в суміш, яка піддається агломерації, може бути введена летуча фаза, тим самим забезпечуючи гомогенну суміш летучої фази з іншими компонентами всередині котуна. Такий підхід корисний у тому розумінні, що він використовує в якості переваги великомасштабні та низьковитратні процеси окочування, використовувані у різних галузях промисловості, таких як чорна металургія. Котуни, що утворюються в результаті таких процесів, зазвичай мають приблизно сферичну форму та можуть мати розмір у діапазоні від декількох міліметрів до декількох десятків міліметрів. Радіус котунів може бути вибраний для одержання необхідної кінетики для процесу відновлення або необхідних характеристик маси й електричного перенесення при використанні в якості електрода у пристрої зберігання енергії, такому як негативний електрод 104 у батареї 100. Прикладом летучої фази, що вводиться в суміш, використовувану при агломерації, є введення коксу в котуни, що використовуються у печах з обертовим подом.

Матеріал на основі заліза також може бути виготовлений у вигляді листів, а не у вигляді котунів. Ці листи можуть бути виготовлені шляхом екструзії або нанесення матеріалу-попередника заліза ракульним ножом на листи. Суміш, що використовується у процесі виробництва листів, може містити летучу фазу. В одному прикладі концентрат магнетитової руди, змішаний з коксом, може бути нанесений за допомогою ракульного ножа у вигляді шару товщиною приблизно 5 мм і згодом відновлений у печі з лінійним подом. В іншому випадку лист може бути розрізаний на смуги та згодом поданий на піч з обертовим подом. Товщина листа може бути вибрана для одержання необхідної кінетики для процесу відновлення або необхідних характеристик маси й електричного перенесення при використанні в якості електрода у пристрої зберігання енергії, такому як негативний електрод 104 у батареї 100.

Інші геометричні форми можуть бути можливі для матеріалу на основі заліза, включаючи стрижні, диски або пластини. Ці геометричні форми, як правило, можуть бути сформовані методами формування деформованих заготовок в області обробки матеріалів у вигляді частинок, включаючи ущільнення листів валками, пресування та шлікерного лиття пластин, а також екструзію для створення стрижнів і дисків. Диски можуть утворюватися в результаті екструзії при використанні круглого штампa, й одержаний матеріал розрізають за формою після виходу зі штампa, ущільнення штампa або шлікерного лиття у циліндричну форму.

У деяких випадках геометрична форма, одержана в результаті процесу відновлення, згодом може бути розбита на дрібні шматочки. В одному прикладі котуни у процесі прямого відновлення, що мають діаметр порядку 10 мм ($\text{мм} = 10^{-3} \text{ м}$), можуть бути роздроблені після етапу відновлення таким чином, що розмір частинок по суті зменшується шляхом подрібнювання до розміру частинок від 1 мм до 6 мм після процесу дроблення. Для здійснення відновлення залізовмісних матеріалів до менше окиснених або металевих форм заліза може бути використана множина процесів.

Згідно з одним аспектом залізовмісні матеріали можуть бути відновлені шляхом розкладання вуглецевмісних матеріалів, що містяться у матеріалі-попереднику або розподілених поруч з матеріалом-попередником. Це може відбуватися шляхом твердофазного відновлення вугіллям, коксом або іншими вуглецевмісними матеріалами, як це відбувається у печах з обертовим подом, що використовується для виробництва заліза прямого відновлення. В інших процесах відновлення, що включають вуглецевмісні матеріали, вуглецевмісний матеріал розподіляється поруч із залізовмісним матеріалом, і відновлення відбувається за допомогою газофазного перенесення відновлювальних сполук із вуглецевмісного матеріалу в залізовмісний матеріал. Наприклад, вугілля може термічно розкладатися у присутності кисню з одержанням різних відновлювальних сполук, включаючи метан, водень та монооксид вуглецю. Будь-який з процесів, що використовуються у процесах відновлення в обертовій сушильній печі або у процесах відновлення у печі з обертовим подом, слід розглядати як застосовний до відновлення залізовмісних матеріалів, включаючи газифікацію вугілля, причому вугілля не знаходиться суворо поруч із залізовмісними матеріалами, але все ще використовується в якості відновлювача.

Залізовмісні матеріали також можуть бути відновлені за допомогою реакції з газофазними відновлювачами. Існує множина способів введення таких відновлювальних газів. Можна розділити ці численні способи виконання відновлення газоподібними компонентами згідно з обладнанням, що використовується для створення процесу відновлення (та на підкатегорії періодичних і безперервних процесів). Процеси також можна розглядати з точки зору атмосфери, яку вони використовують. Невичерпний перелік обладнання, що використовується для створення відновлювальної атмосфери, та типів відновлювальних газів, які можуть бути використані, включає: 1) різне обладнання для введення відновлювальних газів, наприклад, періодичні процеси (наприклад, з використанням камерних печей, з використанням трубчастих печей, з використанням вакуумних печей або з використанням будь-якого іншого типу печей періодичної дії) та/або безперервні процеси (наприклад, з використанням лінійних горизонтальних печей, таких як печі з крокуючим балковим подом, печі з лінійним подом, конвеєрні печі, печі для сушіння, печі для випалення та т.д., з використанням вертикальних шахтних печей, з використанням реакторів з псевдозрідженим шаром, з використанням колосникових печей, таких як печі з колосниковими ґратами, що рухаються, в які вводять відновлювальні гази, і т.д., або з використанням будь-якого іншого типу печей для безперервного процесу); та/або 2) різні типи відновлювальних атмосфер, такі як монооксид вуглецю, водень, метан, сірководень, азот, аргон, дисоційований аміак й/або їх комбінації, відновлювальні атмосфери, що утворюються різними способами, включаючи електроліз, природний газ, реакції природного газу з водою (включаючи використання синтез-газу та синтез-газу, одержаного шляхом реакції зрушення фаз вода-газ) і т.д.

Незважаючи на велику різноманітність таких процесів, загальні риси між ними полягають у тому, що процеси зазвичай потребують температури вище щонайменше 400 °C (зазвичай суттєво вище) та безперервного відновлення газової атмосфери для досягнення розумної кінетики відновлення та розумного завершення реакції відновлення. Необхідна кількість часу в цілому залежить від багатьох факторів (включаючи вихідний матеріал, потрібний кінцевий відновлений стан, розмір частинок, товщину порошкового виробу та т.д.), але типові умови варіюються від 700 °C до 1450 °C і від 15 хвилин до 3 годин при максимальній температурі.

Згідно з ще з одним аспектом залізовмісні матеріали можуть бути електрохімічно відновлені. Це може

відбуватися в лужному електроліті, часто з pH вище 12. Знімання струму та провідники через простір пор можуть бути передбачені для забезпечення проходження успішного електрохімічного процесу. Також може бути виконане відновлення поза лужними середовищами. Відновлення може відбуватися всередині тієї ж електрохімічної комірки, яка використовується для зберігання електрохімічної енергії, наприклад, всередині батареї 100.

Різні варіанти реалізації можуть включати використання пороутворювачів з летучою фазою для утворення пор в електроді, такому як негативний електрод 104. Летуча фаза може бути використана для створення простору пор (тобто діяти як пороутворювач) всередині порошкового ущільненого виробу. Основною вимогою летучої фази, яка діє як пороутворювач, є втримання об'єму відкритим всередині порошкового виробу до досягнення порошковим виробом точки в ході обробки порошкового виробу з достатньою механічною цілісністю, щоб пороутворювач міг бути вилучений, і частина об'єму, залишеного пороутворювачем, залишилася у вигляді пори. Іншими словами, пороутворювач може бути використаний для збільшення пористості матеріалу, в який він доданий. Оскільки різні порошкові вироби досягають достатньої механічної цілісності у різні моменти під час обробки, засоби, за допомогою яких вводять пороутворювачі, та засоби, за допомогою яких видаляють пороутворювач з порошкового виробу, можуть залежати від обробки, що застосовується до порошкового виробу. Надалі вводять декілька способів введення пороутворювачів. По-перше, самі пороутворювачі вводять на основі того, коли/як вони входять та виходять з порошкового ущільненого виробу. Згодом описуються геометричні характеристики пороутворювачів у контексті їх застосування при одержанні залізовмісних електродів для зберігання енергії.

Різні варіанти реалізації можуть включати використання одного або більше матеріалів як пороутворювачів. Як правило, відновлення залізовмісних матеріалів, описане раніше, може відбуватися або шляхом високотемпературного термохімічного відновлення, або шляхом низькотемпературного електрохімічного відновлення.

По-перше, описані пороутворювачі з летучою фазою для процесів високотемпературного відновлення. Існує щонайменше три способи введення пор за допомогою пороутворювача у матеріал, одержаний високотемпературною обробкою: 1) видалення пороутворювача перед високотемпературною обробкою; 2) видалення пороутворювача під час високотемпературної обробки; і/або 3) видалення пороутворювача після високотемпературної обробки. Функціональні характеристики та приклади кожного з них описані нижче.

Для видалення пороутворювача з порошкового виробу перед високотемпературною обробкою пороутворювач може бути спочатку введений у виріб, може бути забезпечена можливість досягнення виробом деякої міцності, а потім пороутворювач може бути вилучений. В одному прикладі цього у виріб може бути введений пороутворювач, який містить сполучний матеріал (часто водорозчинна сполучна речовина, яка твердне при висушуванні від води). Після того, як забезпечена можливість затвердіння сполучного матеріалу або зміцнення матеріалу іншим способом, порошковий виріб може бути оброблений таким чином, що пороутворювач видаляється. В якості конкретного прикладу, пороутворювач може являти собою будь-який матеріал, розчинний в органічному розчиннику (тобто парафіновий віск у гексані), пористий виріб може являти собою залізну руду з використанням цементу (наприклад, бентоніту, карбонату натрію, хлориду кальцію або силікату натрію) в якості сполучного, та після висихання котуна пороутворювач може бути розчинений шляхом впливу на пористий виріб органічним розчинником, який розчиняє пороутворювач, не змінюючи при цьому сполучне. У другому прикладі пористий виріб із залізної руди може використовувати цемент в якості сполучного, і сполучне після висихання може тверднути та ставати нерозчинним у воді. Таким чином, пороутворювач, який розчиняється у воді (наприклад, хлорид натрію або будь-яка інша водорозчинна сіль), може бути видалений з котуна шляхом повторного впливу води на котун. Пороутворювач також може являти собою карбонат металу, такий як карбонат натрію або карбонат кальцію (наприклад, подрібнений вапняк), які розчиняються у м'яких кислих розчинах, що залишають пори. В останньому прикладі твердий пороутворюючий матеріал може бути доданий у пористий виріб, який інертний під час процесу утворення пористого виробу, але легко випаровується під час наступної обробки. Наприклад, бікарбонат амонію може бути доданий до ущільненого виробу з магнетитової руди, причому ущільнення є достатнім для надання достатньої механічної цілісності пористому виробу, щоб бікарбонат амонію міг бути видалений з пористого виробу шляхом випаровування, у той час як частина об'єму, раніше зайнятого бікарбонатом амонію, зберігалася в якості пор. Це випаровування може відбуватися при низьких температурах (-36 – 41 °C) і може бути виконане до високотемпературної обробки.

Також можуть бути додані матеріали, які видаляють на етапах високотемпературної обробки. Існує два такі етапи, які часто відбуваються під час обробки залізовмісних матеріалів-попередників. Перший етап являє собою етап попередньої обробки, який відбувається перед багатьма процесами відновлення та після утворення котунів "доменної печі" та прямого відновлення, називаного затвердінням. У ході цього процесу котуни або інші порошкові вироби окислюються при високих температурах. Завдяки цьому процесу окиснення матеріали також одержують механічну цілісність. Кокс або інші матеріали, які випаровуються у присутності високих температур, можуть бути додані у порошкові вироби, щоб діяти в якості летучих пороутворювачів. Полімери, деревне волокно та вуглецевмісні матеріали, одержані в результаті торефікації, можуть бути додані в якості засобу індукування пористості під час затвердіння. Слід зазначити, що не всі матеріали повинні бути затверджені до відновлення, та, відповідно, цей етап не є суворо необхідним на шляху обробки.

У процесі високотемпературного відновлення порошковий виріб піддається впливу газів, зазвичай монооксиду вуглецю та водню, які зменшують кількість залізовмісних матеріалів. Матеріали, які мають схильність різко змінювати об'єм при впливі таких атмосфер, можуть бути додані до залізовмісних порошкових виробів в якості засобу підвищення пористості одержуваних матеріалів. Наприклад, сульфід та сульфати заліза традиційно не включаються у суміші матеріалів-попередників заліза як вихідних матеріалів для процесів відновлення. Однак у конкретному випадку залізних лужних електродів ці сполуки заліза та сірки можуть служити багатьом корисним цілям. По-перше, було показано, що сірка є корисною сполукою у залізних електродах для підвищення розрядної здатності. По-друге, сульфід та сульфати заліза мають дуже високі відношення

молярного об'єму сполуки до молярного об'єму заліза, що утворюється при розкладанні. Таким чином, ці сполуки заліза та сірки можуть діяти як пороутворювачі при втраті сірки та кисню через ці великі скорочення об'єму. Особливо недорогим й ефективним пороутворювачем відносно цього є сульфат заліза (II), який має відношення об'єму сульфату до об'єму заліза при відновленні 5,9 до 1 у безводному стані, при цьому для гідратованої сполуки спостерігаються ще більші співвідношення об'ємів. Сульфат заліза (II) є побічним продуктом процесу травлення у сталеплавильному виробництві та може бути корисно перероблений у такий спосіб для введення пороутворюючої речовини, яка вводить залишкове залізо та сірку як побічні продукти процесу пороутворення. Інші сульфідні та сульфатні заліза можуть бути аналогічним чином використані в якості летучих фаз, які осаджують залізо та сірку, включаючи, крім іншого, сульфат заліза (II, II), макінавіт, марказит, пірит, троїліт, піротин, грейгіт й аморфний сульфід заліза (II).

Враховуючи, що деякі матеріали можуть піддаватися корисним фазовим перетворенням при впливі кисню та наступному відновленні, інші сполуки можуть бути корисно введені у залізовмісні матеріали, які піддаються затвердінню та наступному відновленню. Згідно з одним аспектом сульфід свинцю може бути подрібнений з одержанням дрібнодисперсних частинок і введений як частина суміші залізовмісного матеріалу перед процесом затвердіння. У процесі затвердіння сульфід свинцю може піддатися випаленню з утворенням оксиду свинцю. Слід зазначити, що температура плавлення та температура кипіння сульфідів свинцю є низькими у порівнянні з типовими температурами затвердіння для котунів оксиду заліза. Для втримання свинцю у котунах процедуру затвердіння може знадобитися проводити при температурах значно нижче температури кипіння сульфідів свинцю (як правило, щонайменше 20 °C) та навіть переважно нижче температури плавлення сульфідів свинцю. Більше високі концентрації кисню та більше тривалий час при температурі можуть знадобитися для досягнення такого ж ступеня затвердіння у порівнянні з процесами затвердіння при більшій високій температурі. Ступінь, в якому рідкий свинець впливає на мікроструктурний розвиток, як правило, залежить від різних компонентів у залізних котунах.

Оксид свинцю згодом може бути відновлений з утворенням металевого свинцю, рівномірно розподіленого у просторі пор залізного виробу. Свинець є відомим інгібітором реакції виділення водню, який конкурує з процесами заряду залізних електродів. Таким чином, включення сульфідів свинцю у залізовмісний матеріал-попередник може призвести до одночасного утворення пори та включенню корисної сполуки в одержаний електрод батареї.

Матеріали можуть діяти як пороутворювачі у залізовмісному матеріалі після процесу відновлення шляхом розчинення. Обмежений набір матеріалів стабільний після відновлення при температурах, які часто перевищують 700 °C, у водні. В одному варіанті реалізації може бути включений діоксид кремнію, який може розчинятися в лужному електроліті. В іншому варіанті реалізації силікат натрію (також відомий як рідке скло) може розчинятися у водному розчині після процесу відновлення. В інших варіантах реалізації силікати, такі як кварц, польовий шпат, слюда, амфібол, піроксен або олівін, можуть бути включені в якості розчинних летучих пороутворювачів. Основні оксиди, які є стабільними у процесі відновлення, такі як оксид натрію, оксид кальцію або оксид магнію, можуть бути легко витравлені з ґрат заліза за допомогою кислоти після процесу відновлення (хоча такі оксиди також можуть розчинятися у лужному розчині). У деяких варіантах реалізації основний оксид спочатку додають у вигляді солі металу, такої як сульфат, карбонат або гідроксид, після чого термічне розкладання до оксиду забезпечує перше зменшення об'єму, що збільшує пористість. Необов'язково, основний оксид може бути згодом видалений розчиненням для подальшого збільшення пористості. Наприклад, кожний карбонат кальцію у вигляді вапняку або доломіту (карбонат кальцію-магнію), або гідроксиду кальцію або гідроксиду магнію буде термічно розкладатися при температурах у діапазоні 500-1100 градусів за Цельсієм, залишаючи свої відповідні оксиди.

Нарешті, для електродів, у яких відновлення повинно відбуватися електрохімічно, пороутворювачі можуть бути вибрані таким чином, щоб вони розчинялися в електроліті. Згідно з одним аспектом пороутворювач може являти собою сіль, яка являє собою компонент електроліту. В якості ілюстрації, компонент лужного електроліту для залізних батарей може являти собою гідроксид калію або натрію. Пороутворювач, виготовлений з гідроксиду калію, може заощадити засоби, діючи і як добавка до електроліту, і як пороутворювач. Згідно з іншим аспектом пороутворювач може являти собою речовину, яка є інертною під час електрохімічної обробки, таку як нітрат амонію або сульфат калію. У деяких варіантах реалізації летучий пороутворювач може бути відновлювачем при перетворенні залізної руди (більше окисненого матеріалу) у металеве залізо. У деяких інших варіантах реалізації на етапі відновлення сам летучий пороутворювач може бути відновлений. У деяких інших варіантах реалізації можуть бути використані множинні пороутворювачі, включаючи комбінації та варіації пороутворювачів, що служать в якості відновлювачів або не беруть участь у реакціях відновлення.

Геометричне співвідношення між пороутворювачем й іншими елементами мікроструктури відіграє важливу роль у визначенні оптимального розміру пороутворювача й об'ємної частки. Можна виділити два загальні режими. В одному режимі продуктивність батареї обмежена розміром пористості, що безпосередньо оточує залізо. У цьому режимі оптимальний розмір частинок пороутворювача приблизно такий самий, як розмір частинок попередника заліза, що вводяться у процес відновлення. У цьому режимі, приблизна відповідність розміру пороутворювача розміру частинок дозволяє пористості, що додана за допомогою додавання пороутворювача, бути найбільше рівномірно розподіленою та з мінімальним розміром пористості, яка безпосередньо не примикає до реагуючої поверхні заліза. Безпосереднє примикання може бути визначене як таке, що знаходиться в межах одного середнього радіуса пор від поверхні заліза. У випадках, коли частинки пороутворювача приблизно нерівновісні, коротка вісь пороутворювача повинна відповідати діаметру частинок залізної руди.

У другому режимі продуктивність батареї обмежена масовим переносом через анод за рахунок заповнення простору пор. У цьому режимі ціль введення пороутворювача полягає у створенні пори, яка є досить великою, щоб вона не заповнювалася продуктом розряду, так що пори можуть діяти як сильно дифузійний шлях через мікроструктуру. У цьому режимі пороутворювач повинен мати розмір частинок, що перевищує у два рази товщину шару продукту розряду, яка може спостерігатися на поверхні заліза, що прореагувало. Таким чином, пори повинні залишатися відкритими після утворення продукту розряду та полегшувати масове перенесення через електрод. У

випадках, коли пороутворювач приблизно не рівновісний, коротка вісь пороутворювача повинна відповідати вказівкам про те, що товщина щонайменше у два рази перевищує товщину шару продукту розряду. У випадках, коли необхідно створити дифузійні шляхи через пористий виріб, які не будуть засмічуватися, співвідношення сторін пороутворювача призведе до різних порогів просочування залишкової пористості при різних співвідношеннях сторін. Стрижні з високим співвідношенням сторін будуть просочуватися при найменшій об'ємній частці у випадково зібраних пористих виробах, що потенційно дозволяє одержати найбільший приріст у дифузійній кінетиці при найменшій об'ємній частці пороутворювача (й, отже, при найменшій доданій вартості). У цілому для другого режиму, імовірно, буде спостерігатися зменшення продуктивності у добавках пороутворювачів вище приблизно 30-35 об. % пороутворювача (де об'ємна частка пороутворювача виражена у відсотках від твердих частинок, доданих у пористий виріб) через високу пористість, що досягається після відновлення, та високої імовірності просочування результативної пористості. Проте, у споріднених електродних системах було продемонстровано, що більше висока об'ємна частка пороутворювачів надає деяку перевагу на характеристики батареї, кількісно обумовлені збільшенням розрядної ємності батареї. Об'ємна частка пороутворювача у деяких варіантах реалізації може становити до 45 об. % при збереженні переваг для збільшення ємності анода. У той час як об'ємні частки пороутворювача з високим вмістом пор, як правило, корисні для деяких аспектів продуктивності батареї, границі можуть бути встановлені для об'ємної частки пороутворювача у відповідності з тим, де спостерігається розумне збільшення продуктивності, й у деяких випадках, де пороутворююча речовина ефективна в якості відновлювача під час процесу відновлення. У багатьох обставинах потрібно щонайменше 5 об. % пороутворювача для того, щоб одержати істотне збільшення продуктивності батареї та реалізувати достатнє збільшення продуктивності. У випадку коксу, доданого в магнетитові руди, замість цього можна використовувати масову відсоткову основу для кількісного визначення кількості включеної пороутворюючої добавки. У випадку коксу, що додається у магнетитові руди, масовий відсоток коксу від 3 до 10 мас. %, як правило, достатній для досягнення бажаної комбінації пороутворення та відновлення.

Пороутворювачі, які набагато більше обговорюваних меж (наприклад, приблизно у два рази більше товщини шару розряду та приблизно середнього розміру частинок), швидше за все, забезпечать менше поліпшення продуктивності у порівнянні з більше дрібними пороутворювачами на еквівалентній об'ємній основі. У всіх випадках, у міру збільшення об'ємної частки пороутворювача, перенесення маси стає більше простим, і поляризація за рахунок перенесення маси зменшується, у той час як ефективна провідність пористого виробу зменшується, як і об'ємна щільність енергії електрода. Оптимальну кількість пороутворювача можна направляти за допомогою вимірювання імпедансу та вимірювання домінуючого джерела імпедансу в системі та міркувань навколо необхідної щільності енергії системи. Існує компроміс відносно пористості, який полягає в тому, що збільшення пористості поліпшить перенесення іонів (кінетику), але зменшить щільність енергії на одиницю об'єму; цей компроміс має на увазі, що для даної швидкості буде оптимальна пористість для максимізації щільності енергії.

У цілому, додавання пороутворювачів набагато більше дрібного розміру, ніж розмір частинок вихідних залізовмісних матеріалів, навряд чи призведе до значного збільшення пористості, хоча це може призвести до інших позитивних характеристик процесу (наприклад, більш ефективному відновленню та більше швидкій кінетиці відновлення у процесах відновлення з обертовим подом).

У деяких конфігураціях електродів комбінації вищевказаних ефектів можуть бути використані для одержання суперпозиції бажаних ефектів. Наприклад, для збільшення доступного об'єму для утворення продукту розряду може бути доданий тонкодисперсний, рівновісний пороутворювач за порядком розміру частинок, а для поліпшення перенесення маси через пористий виріб може бути доданий більший, з високим співвідношенням сторін, волоконподібний пороутворювач.

Як правило, пороутворюючі агенти можуть бути корисно об'єднані, коли їх різні ролі комплементарні. В одному ілюстративному прикладі кокс може бути доданий для виконання процесу відновлення залізовмісних попередників у твердому стані, але додавання занадто великої кількості коксу може призвести до небажаного високого вмісту вуглецю після процесу відновлення. В обставинах, коли бажана більша кількість пороутворювача, ніж може бути додана, не призводячи до небажаного високого вмісту вуглецю, на додаток до коксу може бути додана друга пороутворююча добавка для забезпечення пороутворюючої функції без додавання додаткового вуглецю, у той час як рівень коксу підтримується на рівні, достатньому для здійснення потрібної реакції відновлення.

Джерелами для залізовмісних матеріалів, що використовуються у різних варіантах реалізації, можуть бути будь-які матеріали, зазвичай використовувані в залізних електродах або промислових процесах відновлення заліза, включаючи, окрім всього, наступні приклади: 1) сталеплавильний пил; 2) прокатна окалина (наприклад, прокатна окалина може бути подрібнена або іншим способом оброблена для досягнення відповідного розміру та форми); 3) залізні руди, включаючи руди, які були сконцентровані та/або витягнуті, наприклад, шляхом флотаційної сепарації або магнітної сепарації (наприклад, залізні руди можуть включати в себе гематитові руди, магнетитові руди, сполуки заліза з сіркою та т.д.);

4) залізні сітки та дроти, вбудовані в електрод, щоб служити в якості струмознімача та/або джерела заліза; і 5) комбінації одного або більше прикладів 1-4 у комбінації з порошками заліза, такими як порошки карбонільного заліза, губчатого заліза, розпилені у воді порошки та т.д.

Можна також просто використовувати кокс в якості пороутворюючої летучої фази при створенні спечених залізних електродів без етапу відновлення. Кокс є одним із найдешевших пороутворювачів у розрахунку на одиницю об'єму, а також забезпечує набагато менше суворий контроль атмосфери під час процесу спікання завдяки захисному відновлювальному середовищу, що створюється коксом всередині порошкоподібної маси. Розміри частинок матеріалів-попередників заліза можуть бути вибрані на основі розмірів частинок, властивих вищестоячим процесам, що використовується для одержання джерела залізної руди, на основі розміру частинок, необхідного для успішного відновлення джерела залізної руди під час відповідного застосовуваного процесу

відновлення, або на основі одержаного матеріалу залізного електрода, що досягає достатньої продуктивності під час електрохімічного циклу. Як правило, дрібнодисперсні частинки руди потрібні як для процесів відновлення, так і для електрохімічних характеристик, при цьому успішні розміри частинок перед відновленням становлять менше $d_{90} < 45$ мікрон для руд на основі магнетиту для часових шкал розряду батареї близько 10 годин. (d_N - діаметр частинок, що відповідає N-му процентилу у розподілі частинок за розмірами. Наприклад, d_{90} означає 90-й перцентиль розподілу частинок за розмірами, або зазначено інакше, що 90 % частинок у даному розподілі мають розмір нижче d_{90} . Це може бути виміряно за допомогою динамічного способу розсіювання світла, візуалізації або інших способів, відомих у даній області техніки.) Інші розміри частинок можливі на основі процесу відновлення та застосовуваного електрохімічного процесу, при цьому більше тривалий час відновлення та більше низькі швидкості електрохімічного заряду/розряду дозволяють використовувати більші розміри частинок. Для батарей, де потрібна висока продуктивність, може знадобитися розмір попередника заліза з бажаними розмірами попередника $d_{50} \sim 8$ мікрон. Прагнення до тонкості поступаючих матеріалів-попередників заліза, як правило, урівноважується міркуваннями вартості, що пов'язані з виконанням більше інтенсивних операцій подрібнювання.

Згідно з різними варіантами реалізації, описаними вище, на ФІГ. 2 показані етапи способу 200 згідно з різними варіантами реалізації для утворення електрода, такого як негативний електрод 104, з використанням одного або більше летучих пороутворювачів. На етапі 202 можуть бути передбачені матеріали для відновлення з одержанням електрода, такого як негативний електрод 104. Матеріали можуть бути матеріалами, розглянутими вище, такими як матеріали на основі металу, такі як матеріали на основі заліза. Матеріали можуть являти собою матеріали-попередники, такі як котуни-попередники заліза, листи-попередники заліза, смуги-попередники заліза, диски- попередники заліза, стрижні-попередники заліза, порошки-попередники заліза та т.д. В якості конкретних прикладів метали можуть являти собою сталеплавильний пил, прокатну окалину, залізну руду, залізну сітку, залізний дріт, залізний порошок або будь-яку їхню комбінацію.

На етапі 204 у матеріали може бути доданий один або більше летучих пороутворювачів. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач може являти собою відновлювач, такий як вуглець. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач являє собою сульфат заліза (II), сульфат заліза (II, II), макнівіт, марказит, пірит, тріліт, піротин, грейгіт, сульфід аморфного заліза (II) або сульфід свинцю. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач може являти собою вугілля. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач може являти собою діоксид кремнію, силікат натрію, оксид натрію, оксид кальцію або оксид магнію. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач може включати в себе кокс. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач може включати в себе карбонат металу. У різних варіантах реалізації летучий пороутворювач являє собою два або більше різних летучих пороутворювачів.

У процесах високотемпературного відновлення, як обговорювалося вище, додавання одного або більше летучих пороутворювачів на етапі 204 може відбуватися до або під час процесів високотемпературного відновлення.

У варіантах реалізації, в яких може відбуватися електрохімічне відновлення електрода, додавання летучого пороутворювача на етапі 204 може відбуватися під час електрохімічного відновлення, наприклад, під час відновлення батареї (наприклад, 100). Наприклад, летучий пороутворювач може являти собою сіль електроліту (наприклад, електроліту 106). Коли додавання летучого пороутворювача на етапі 204 може відбуватися під час електрохімічного відновлення, летучий пороутворювач може являти собою калій, гідроксид натрію, нітрат амонію та/або сульфат калію.

У деяких необов'язкових варіантах реалізації на необов'язковому етапі 205 щонайменше частина летучого пороутворювача може бути видалена перед відновленням на етапі 206. Відповідно, етап 205 може бути необов'язковим. Як зазначено вище, летучий пороутворювач може бути розчинений або випарований перед відновленням.

На етапі 206 може відбутися відновлення пористого електрода. Відновлення може бути здійснене за допомогою високотемпературної обробки або за допомогою низькотемпературних електрохімічних процесів, таких як електрохімічне відновлення у батареї (наприклад, 100). Як обговорювалося вище, процес відновлення, будь то термічний або електрохімічний, може призвести до видалення щонайменше частини одного або більше летучих пороутворювачів, тим самим утворюючи пори в одержаному електроді. В якості конкретного прикладу може бути сформований пористий металевий електрод, такий як пористий металевий електрод, що містить залізо.

У деяких необов'язкових варіантах реалізації на необов'язковому етапі 207 щонайменше частина летучого пороутворювача може бути видалена після відновлення на етапі 206. Відповідно, етап 207 може бути необов'язковим. Як зазначено вище, летучий пороутворювач може бути розчинений електролітом у батареї після відновлення, розчинений у водному розчині, витравлений з використанням кислотної ванни після відновлення та т.д.

Різні варіанти реалізації можуть забезпечувати пристрої та/або способи для застосування у великомасштабних системах зберігання енергії, таких як системи тривалого зберігання енергії (long duration energy storage, LODES), системи короткочасного зберігання енергії (short duration energy storage, SDES) та т.д. В якості прикладу різні варіанти реалізації можуть забезпечувати батареї для великомасштабних систем зберігання енергії, таких як батареї для систем тривалого зберігання енергії. Поновлювані джерела енергії стають все більше розповсюдженими й економічно ефективними. Однак у випадку багатьох поновлюваних джерел енергії виникає проблема виникаючих перерв, яка перешкоджає впровадженню поновлюваних джерел енергії. Вплив виникнення перерв у роботі поновлюваних джерел енергії частково усувають за допомогою об'єднання поновлюваних джерел енергії з великомасштабними системами зберігання енергії, такими як системи тривалого зберігання енергії, системи короткочасного зберігання енергії та т.д. Для підтримання впровадження комбінованих систем вироблення, передачі та зберігання енергії (наприклад, електростанції, що має поновлюване джерело вироблення енергії у парі з великомасштабною системою зберігання енергії й об'єктами

передачі на будь-якій електростанції та/або великомасштабній системі зберігання енергії) необхідні пристрої та способи для підтримання проектування та роботи таких комбінованих систем вироблення, передачі та зберігання енергії, такі як різні варіанти реалізації пристроїв і способів, зазначені у даному документі.

Комбінована система вироблення, передачі та зберігання енергії являє собою електростанцію, що включає одне або більше джерел вироблення енергії (наприклад, одне або більше поновлюваних джерел вироблення енергії, одне або більше неоновлюваних джерел вироблення енергії, комбінації поновлюваних і неоновлюваних джерел вироблення енергії та т.д.), один або більше об'єктів передачі й одну або більше великомасштабних систем зберігання енергії. Об'єкти передачі на будь-якій електростанції та/або великомасштабних системах зберігання енергії спільно оптимізовані із системою вироблення та зберігання енергії або накладають обмеження на проектування та роботу системи вироблення і зберігання енергії. Комбіновані системи вироблення, передачі та зберігання енергії конфігурують для досягнення різних цілей за вихідною потужністю при різних конструктивних і робочих обмеженнях.

ФІГ. 3-11 ілюструють різні приклади систем, в яких один або більше аспектів різних варіантів реалізації можуть бути використані як частина великомасштабних систем зберігання енергії, таких як системи тривалого зберігання енергії, системи короткочасного зберігання енергії та т.д. Наприклад, різні варіанти реалізації, описані у даному документі з посиланням на ФІГ. 1-2, можуть бути використані в якості батарей для великомасштабних систем зберігання енергії, таких як системи тривалого зберігання енергії, системи короткочасного зберігання енергії та т.д., і/або різні електроди, описані у даному документі, можуть бути використані в якості компонентів для великомасштабних систем зберігання енергії. Використовуваний у даному документі термін "система тривалого зберігання енергії" може означати великомасштабну систему зберігання енергії, виконану таким чином, щоб мати час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 24 години (год.) або більше, такий як час роботи у номінальному режимі 24 години, час роботи у номінальному режимі від 24 годин до 50 годин, час роботи у номінальному режимі більше 50 годин, час роботи у номінальному режимі від 24 годин до 150 годин, час роботи у номінальному режимі більше 150 годин, час роботи у номінальному режимі від 24 годин до 200 годин, час роботи у номінальному режимі більше 200 годин, час роботи у номінальному режимі від 24 годин до 500 годин, час роботи у номінальному режимі більше 500 годин і т.д.

ФІГ. 3 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу використовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 304 тривалого зберігання енергії електрично підключена до вітряної електростанції 302 й одного або більше об'єктів 306 передачі. Вітряна електростанція 302 електрично підключена до об'єктів 306 передачі. Об'єкти 306 передачі електрично підключені до мережі 308. Вітряна електростанція 302 виробляє енергію, а також вітряна електростанція 302 виводить вироблену енергію в систему 304 тривалого зберігання енергії й/або об'єкти 306 передачі. Система 304 тривалого зберігання енергії накопичує енергію, одержану від вітряної електростанції 302 й/або об'єктів 306 передачі. Система 304 тривалого зберігання енергії виводить накопичену енергію в об'єкти 306 передачі. Об'єкти 306 передачі виводять енергію, одержану від однієї або обох вітряних електростанцій 302 та системи 304 тривалого зберігання енергії, в мережу 308 й/або одержують енергію з мережі 308 та виводять дану енергію у систему 304 тривалого зберігання енергії. Разом вітряна електростанція 302, система 304 тривалого зберігання енергії й об'єкти 306 передачі можуть становити електростанцію 300, яка може бути комбінованою системою вироблення, передачі та зберігання енергії. Енергія, вироблювана вітряною електростанцією 302, прямо подається в мережу 308 через об'єкти 306 передачі або спочатку накопичується у системі 304 тривалого зберігання енергії. У деяких випадках енергія, що подається в мережу 308, повністю надходить від вітряної електростанції 302, повністю надходить з системи 304 тривалого зберігання енергії або з комбінації вітряної електростанції 302 та системи 304 тривалого зберігання енергії. Передачу енергії від комбінованої електростанції 300, що складається з вітряної електростанції 302 та системи 304 тривалого зберігання енергії, контролюють відповідно до встановленого довгострокового (багаторічного або навіть багаторічного) графіку, або контролюють відповідно до ринку "на добу вперед" (з попереднім повідомленням за 24 години), або контролюють відповідно до ринку "на годину вперед", або контролюють у відповідь на сигнали ціноутворення в реальному часі.

В якості одного з прикладів роботи електростанції 300 систему 304 тривалого зберігання енергії застосовують для перетворення та "закріплення" енергії, виробленої вітряною електростанцією 302. В одному такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 260 мегават (МВт), а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 41 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність (потужність) 106 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 годин (год.) і номінальне енергоспоживання 15900 мегават-годин (МВт-год.). В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 300 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 41 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 106 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 200 год. і номінальне енергоспоживання 21200 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 176 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 53 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність (потужність) 88 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 год. і номінальне енергоспоживання 13200 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 277 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 41 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність (потужність) 97 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 50 год. і номінальне енергоспоживання 4850 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить

315 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 41 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність (потужність) 110 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 25 год. і номінальне енергоспоживання 2750 МВт-год.

ФІГ. 4 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу використовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система на ФІГ. 4 може бути аналогічною системі на ФІГ. 3 за винятком того, що фотоелектрична (PV) електростанція 402 може бути замінена вітряною електростанцією 302. Система 304 тривалого зберігання енергії електрично підключена до фотоелектричної електростанції 402 й одного або більше об'єктів 306 передачі. Фотоелектрична електростанція 402 електрично підключена до об'єктів 306 передачі. Об'єкти 306 передачі електрично підключені до мережі 308. Фотоелектрична електростанція 402 виробляє енергію, а також фотоелектрична електростанція 402 виводить вироблену енергію у систему 304 тривалого зберігання енергії й/або об'єкти 306 передачі. Система 304 тривалого зберігання енергії накопичує енергію, одержану від фотоелектричної електростанції 402 й/або об'єктів 306 передачі. Система 304 тривалого зберігання енергії виводить накопичену енергію в об'єкти 306 передачі. Об'єкти 306 передачі виводять енергію, одержану від однієї або обох фотоелектричних електростанцій 402 та системи 304 тривалого зберігання енергії, в мережу 308 й/або одержують енергію з мережі 308 та виводять дану енергію у систему 304 тривалого зберігання енергії. Разом фотоелектрична електростанція 402, система 304 тривалого зберігання енергії й об'єкти 306 передачі являють собою комбіновану електростанцію 400, яка являє собою комбіновану систему вироблення, передачі та зберігання енергії. Енергія, вироблювана фотоелектричною електростанцією 402, прямо подається в мережу 308 через об'єкти 306 передачі або спочатку накопичується у системі 304 тривалого зберігання енергії. У деяких випадках енергія, що подається в мережу 308, повністю надходить від фотоелектричної електростанції 402, повністю надходить з системи 304 тривалого зберігання енергії або з комбінації фотоелектричної електростанції 402 та системи 304 тривалого зберігання енергії. Передачу енергії від комбінованої електростанції 400, що складається з фотоелектричної електростанції 402 та системи 304 тривалого зберігання енергії, контролюють відповідно до встановленого довгострокового (багаторічного або навіть багаторічного) графіку, або контролюють відповідно до ринку "на добу вперед" (з попереднім повідомленням за 24 години), або контролюють відповідно до ринку "на годину вперед", або контролюють у відповідь на сигнали ціноутворення в реальному часі.

В якості одного з прикладів роботи електростанції 400 систему 304 тривалого зберігання енергії застосовують для перетворення та "закріплення" енергії, виробленої фотоелектричною електростанцією 402. В одному такому прикладі пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 490 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 24 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність (потужність) 340 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 год. і номінальне енергоспоживання 51000 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 680 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 24 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 410 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 200 год. і номінальне енергоспоживання 82000 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 330 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 31 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 215 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 год. і номінальне енергоспоживання 32250 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 510 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 24 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 380 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 50 год. і номінальне енергоспоживання 19000 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 630 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 24 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 380 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 25 год. і номінальне енергоспоживання 9500 МВт-год. ФІГ. 5 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу застосовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система, наведена на ФІГ. 5, може бути аналогічною системам на ФІГ. 3 і 4 за винятком того, що вітряна електростанція 302 та фотоелектрична (PV) електростанція 402 обидві можуть бути генераторами енергії, що спільно працюють на електростанції 500. Разом фотоелектрична електростанція 402, вітряна електростанція 302, система 304 тривалого зберігання енергії й об'єкти 306 передачі являють собою комбіновану електростанцію 500, яка являє собою комбіновану систему вироблення, передачі та зберігання енергії. Енергія, вироблювана фотоелектричною електростанцією 402 та/або вітряною електростанцією 302, прямо подається в мережу 308 через об'єкти 306 передачі або спочатку накопичується у системі 304 тривалого зберігання енергії. У деяких випадках енергія, що подається в мережу 308, повністю надходить від фотоелектричної електростанції 402, повністю надходить від вітряної електростанції 302, повністю надходить з системи 304 тривалого зберігання енергії або з комбінації фотоелектричної електростанції 402, вітряної електростанції 302 та системи 304 тривалого зберігання енергії. Передачу енергії від комбінованої електростанції 500, що складається з вітряної електростанції 302, фотоелектричної електростанції 402 та системи 304 тривалого зберігання енергії, контролюють відповідно до встановленого довгострокового (багаторічного або навіть багаторічного) графіку, або контролюють відповідно до ринку "на добу вперед" (з

попереднім повідомленням за 24 години), або контролюють відповідно до ринку "на годину вперед", або контролюють у відповідь на сигнали ціноутворення в реальному часі.

В якості одного з прикладів роботи електростанції 500 систему 304 тривалого зберігання енергії застосовують для перетворення та "закріплення" енергії, виробленої вітряною електростанцією 302 та фотоелектричною електростанцією 402. В одному такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 126 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 41 %, і пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 126 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 24 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 63 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 год. і номінальне енергоспоживання 9450 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 170 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 41 %, і пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 110 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 24 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 57 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 200 год. і номінальне енергоспоживання 11400 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 105 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 51 %, і пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 70 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 31 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 61 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 150 год. і номінальне енергоспоживання 9150 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 135 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 41 %, і пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 90 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 24 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 68 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 50 год. і номінальне енергоспоживання 3400 МВт-год. В іншому такому прикладі пікове вироблення (потужність) вітряної електростанції 302 становить 144 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 41 %, і пікове вироблення (потужність) фотоелектричної електростанції 402 становить 96 МВт, а коефіцієнт використання потужності (CF) становить 24 %. Система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 72 МВт, час роботи у номінальному режимі (співвідношення енергія/потужність) 25 год. і номінальне енергоспоживання 1800 МВт-год.

ФІГ. 6 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації застосовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 304 тривалого зберігання енергії електрично підключена до одного або більше об'єктів 306 передачі. Таким чином, система 304 тривалого зберігання енергії працює "автономно" для регулювання енергії відповідно до ринкових цін і/або щоб уникнути обмежень передачі. Система 304 тривалого зберігання енергії електрично підключена до одного або більше об'єктів 306 передачі. Об'єкти 306 передачі електрично підключені до мережі 308. Система 304 тривалого зберігання енергії накопичує енергію, одержану від об'єктів 306 передачі. Система 304 тривалого зберігання енергії виводить накопичену енергію в об'єкти 306 передачі. Об'єкти 306 передачі виводять енергію, одержану від системи 304 тривалого зберігання енергії, в мережу 308 й/або одержують енергію з мережі 308 та виводять дану енергію у систему 304 тривалого зберігання енергії. Разом система 304 тривалого зберігання енергії й об'єкти 306 передачі становлять електростанцію 900. Як приклад електростанція 900 розташована нижче за потоком від обмеження передачі, близько до місця споживання електроенергії. У такому прикладі розташованої нижче за потоком електростанції 600 тривалість роботи системи 304 тривалого зберігання енергії становить від 24 до 500 годин, а сама система 304 тривалого зберігання енергії піддається одному або більше повним розрядам у рік для підтримання пікових значень споживання електроенергії у періоди, коли пропускної здатності недостатньо для обслуговування споживачів. Крім того у такому прикладі розташованої нижче за потоком електростанції 600 система 304 тривалого зберігання енергії піддається декільком неглибоким розрядам (щодня або з більше високою частотою) для визначення різниці між цінами на електроенергію у нічний та денний час і зниження загальних витрат на послуги електропостачання для споживача. В якості додаткового прикладу, електростанція 600 розташована перед обмеженням передачі, близько до місця вироблення електроенергії. У такому прикладі розташованої вище за потоком електростанції 600 система 304 тривалого зберігання енергії має тривалість роботи від 24 до 500 годин і може піддаватися одному або більше повним зарядам у рік для поглинання надлишкового вироблення у той час, коли пропускної здатності недостатньо для розподілу електроенергії серед споживачів. Крім того, у такому прикладі розташованої вище за потоком електростанції 600 система 304 тривалого зберігання енергії піддається декільком неглибоким зарядам і розрядам (щодня або з більше високою частотою для визначення різниці між цінами на електроенергію у нічний та денний час і максимізації значення вироблення електроенергії генеруючих потужностей).

ФІГ. 7 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу застосовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 304 тривалого зберігання енергії електрично підключена до торгово-промислового (C&I) споживача 702, такого як центр обробки даних, завод і т.д. Система 304 тривалого зберігання енергії електрично підключена до одного або більше об'єктів 306 передачі. Об'єкти 306 передачі електрично підключені до мережі 308. Об'єкти 306 передачі одержують енергію від мережі 308 та виводять дану енергію у систему 304 тривалого зберігання енергії. Система 304 тривалого зберігання енергії накопичує енергію, одержану від об'єктів

306 передачі. Система 304 тривалого зберігання енергії виводить накопичену енергію торгово-промислового (C&I) споживачу 702. Таким чином, система 304 тривалого зберігання енергії працює для перетворення електроенергії, що одержана з мережі 308, у відповідності зі структурою споживання торгово-промислового (C&I) споживача 702.

Разом система 304 тривалого зберігання енергії й об'єкти 306 передачі становлять електростанцію 700. Як приклад електростанція 700 розташована близько до місця споживання електроенергії, тобто близько до торгово-промислового споживача 702, наприклад, між мережею 308 та торгово-промисловим споживачем 702. У такому прикладі система 304 тривалого зберігання енергії має тривалість роботи від 24 до 500 годин і може здобувати електроенергію на ринках і, таким чином, заряджає систему 304 тривалого зберігання енергії у той час, коли електроенергія дешевше. Потім система 304 тривалого зберігання енергії розряджається для забезпечення електроенергією торгово-промислового споживача 702 у той час, коли ринкова ціна є високою, що компенсує ринкові надходження торгово-промислового споживача 702. В якості альтернативної конфігурації замість розташування між мережею 308 та торгово-промисловим споживачем 702, електростанція 700 розташована між поновлюваним джерелом, таким як фотоелектрична електростанція, вітряна електростанція та т.д., а об'єкти 306 передачі підключені до поновлюваного джерела. У такому альтернативному прикладі тривалість роботи системи 304 тривалого зберігання енергії становить від 24 до 500 годин, а сама система 304 тривалого зберігання заряджається у той час, коли доступна поновлювана енергія. Потім система 304 тривалого зберігання енергії розряджається для забезпечення торгово-промислового споживача 702 поновлюваною вироблюваною електроенергією, щоб покрити частину або всю потребу торгово-промислового споживача 702 в електроенергії.

ФІГ. 8 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу застосовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 304 тривалого зберігання енергії електрично підключена до вітряної електростанції 302 й одного або більше об'єктів 306 передачі. Вітряна електростанція 302 електрично підключена до об'єктів 306 передачі. Об'єкти 306 передачі електрично підключені до торгово-промислового споживача 702. Вітряна електростанція 302 виробляє енергію, а також вітряна електростанція 302 виводить вироблену енергію у систему 304 тривалого зберігання енергії й/або об'єкти 306 передачі. Система 304 тривалого зберігання енергії накопичує енергію, одержану від вітряної електростанції 302. Система 304 тривалого зберігання енергії виводить накопичену енергію в об'єкти 306 передачі. Об'єкти 306 передачі виводять енергію, одержану від однієї або обох вітряних електростанцій 302 та системи 304 тривалого зберігання енергії, торгово-промислового споживачу 702. Разом вітряна електростанція 302, система 304 тривалого зберігання енергії й об'єкти 306 передачі можуть становити електростанцію 800, яка може бути комбінованою системою вироблення, передачі та зберігання енергії. Енергія, вироблювана вітряною електростанцією 302, прямо подається торгово-промислового споживачу 702 через об'єкти 306 передачі або спочатку накопичується у системі 304 тривалого зберігання енергії. У деяких випадках енергія, що поставляється торгово-промислового споживачу 702, повністю надходить від вітряної електростанції 302, повністю надходить з системи 304 тривалого зберігання енергії або з комбінації вітряної електростанції 302 та системи 304 тривалого зберігання енергії. Система 304 тривалого зберігання енергії може бути використана для перетворення електроенергії, вироблюваної вітряною електростанцією 302, у відповідності зі структурою споживання торгово-промислового споживача 702. В одному з таких прикладів тривалість роботи системи 304 тривалого зберігання енергії становить від 24 до 500 годин, а сама система 304 тривалого зберігання заряджається у той час, коли вироблення поновлюваної енергії за допомогою вітряної електростанції 302 перевищує споживання електроенергії торгово-промисловим споживачем 702. Потім система 304 тривалого зберігання енергії розряджається, коли вироблення поновлюваної енергії за допомогою вітряної електростанції 302 не відповідає споживанню електроенергії торгово-промисловим споживачем 702, щоб надати торгово-промислового споживачу 702 твердий профіль поновлюваної енергії, який компенсує частину або все споживання електроенергії торгово-промисловим споживачем 702.

ФІГ. 9 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу застосовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 304 тривалого зберігання енергії є частиною електростанції 900, яку застосовують для інтеграції більших об'ємів вироблення поновлюваної енергії у мікромережі й узгодження вироблення поновлюваної енергії за допомогою, наприклад, фотоелектричної електростанції 402 та вітряної електростанції 302, з існуючим виробленням теплової енергії за допомогою, наприклад, теплової електростанції 902 (наприклад, газогенераторного встановлення, вугільної електростанції, дизель-генераторного встановлення та т.д. або комбінації способів вироблення теплової енергії), у той час як вироблення поновлюваної енергії та вироблення теплової енергії забезпечують споживання електроенергії торгово-промисловим споживачем 702 з високим ступенем готовності. Мікромережі, такі як мікромережі, що утворені за допомогою електростанції 900 та теплової електростанції 902, забезпечують готовність, що становить 90 % або вище. Енергія, що виробляється фотоелектричною електростанцією 402 та/або вітряною електростанцією 302, прямо подається торгово-промислового споживачу 702 або спочатку накопичується у системі 304 тривалого зберігання енергії.

У деяких випадках енергія, що подається торгово-промислового споживачу 702, повністю надходить від фотоелектричної електростанції 402, повністю надходить від вітряної електростанції 302, повністю надходить з системи 304 тривалого зберігання енергії, повністю надходить від теплової електростанції 902 або з комбінації фотоелектричної електростанції 402, вітряної електростанції 302, системи 304 тривалого зберігання енергії

та/або теплової електростанції 902. Як приклад, тривалість роботи системи 304 тривалого зберігання енергії електростанції 900 становить від 24 год. до 500 год. В якості конкретного прикладу споживання електроенергії торгово-промисловим споживачем 702 має пікову потужність 100 МВт, система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 14 МВт і час роботи у номінальному режимі 150 год., вартість природного газу за мільйон британських теплових одиниць (М БТО) становить 6 доларів, а впровадження поновлюваних джерел енергії становить 58 %. В якості іншого конкретного прикладу споживання електроенергії торгово-промисловим споживачем 702 має пікову потужність 100 МВт, система 304 тривалого зберігання енергії має номінальну потужність 25 МВт і час роботи у номінальному режимі 150 год., вартість природного газу за мільйон британських теплових одиниць (М БТО) становить 8 доларів, а впровадження поновлюваних джерел енергії становить 65 %.

ФІГ. 10 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу використовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Систему 304 тривалого зберігання енергії застосовують для збільшення атомної електростанції 1002 (або іншого твердого об'єкта вироблення, такого як теплова електростанція, біопаливна електростанція та т.д., і/або встановлення будь-якого іншого типу, що має швидкість лінійної зміни нижче 50 % від номінальної потужності за одну годину та з високим коефіцієнтом використання потужності у 80 % або вище), щоб додати гнучкості до об'єднаної потужності електростанції 1000, що складається з комбінації системи 304 тривалого зберігання енергії й атомної електростанції 1002. Атомна станція 1002 працює з високим коефіцієнтом використання потужності та з максимальною ефективністю, поки система 304 тривалого зберігання енергії заряджається та розряджається для ефективного перетворення вихідної потужності атомної електростанції 1002 відповідно до споживання електроенергії споживачем і/або ринковою ціною на електроенергію. Як приклад, тривалість роботи системи 304 тривалого зберігання енергії електростанції 1000 становить від 24 год. до 500 год. В одному конкретному прикладі номінальна потужність атомної електростанції 1002 становить 1000 МВт, а саму атомну електростанцію 1002 переводять на тривалі періоди мінімального стабільного вироблення або навіть відключають через занижені ринкові ціни на електроенергію. Система 304 тривалого зберігання енергії дозволяє уникнути зупинок підприємства та заряджається у період низьких ринкових цін; і система 304 тривалого зберігання енергії згодом розряджається та підвищує загальне вироблення електроенергії під час завищених ринкових цін.

ФІГ. 11 ілюструє приклад системи, в якій один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу використовують як частину великомасштабної системи зберігання енергії. В якості конкретного прикладу великомасштабна система зберігання енергії, яка включає один або більше аспектів різних варіантів реалізації винаходу, являє собою систему 304 тривалого зберігання енергії. Як приклад, система 304 тривалого зберігання енергії може містити різні приклади батарей, описані у даному документі, різні електроди, описані у даному документі, та т.д. Система 304 тривалого зберігання енергії працює разом з системою 1102 короткочасного зберігання енергії. Разом система 304 тривалого зберігання енергії та система 1102 короткочасного зберігання енергії становлять електростанцію 1100. Як приклад система 304 тривалого зберігання енергії та система 1102 короткочасного зберігання енергії спільно оптимізовані, при цьому система 304 тривалого зберігання енергії надає різні послуги, включаючи довгочасне резервування та/або подолання багатоденних коливань (наприклад, багатоденних коливань ринкових цін, вироблення поновлюваної електроенергії, споживання електроенергії та т.д.), а система 1102 короткочасного зберігання енергії надає різні послуги, у тому числі швидкі допоміжні послуги (наприклад, контроль над напругою, регулювання частоти і т.д.) та/або подолання внутрішньоденних коливань (наприклад, внутрішньоденних коливань ринкових цін, вироблення поновлюваної електроенергії, споживання електроенергії та т.д.). Тривалість роботи системи 1102 короткочасного зберігання енергії становить менше 10 годин, а ефективність перетворення енергії становить більше 80 %. Тривалість роботи системи 304 тривалого зберігання енергії становить від 24 до 500 годин, а ефективність перетворення енергії становить більше 40 %. В одному з таких прикладів система 304 тривалого зберігання енергії має тривалість 150 годин і підтримує споживання електроенергії споживачем протягом тижня в умовах недовироблення поновлюваної електроенергії. Система 304 тривалого зберігання енергії також підтримує споживання електроенергії споживачем під час внутрішньоденного недовироблення поновлюваної електроенергії, розширюючи можливості системи 1102 короткочасного зберігання енергії. Крім того, система 1102 короткочасного зберігання енергії забезпечує споживачів під час внутрішньоденного недовироблення, забезпечує підтримку якості електроенергії та надає якісні послуги, такі як контроль над напругою та регулювання частоти.

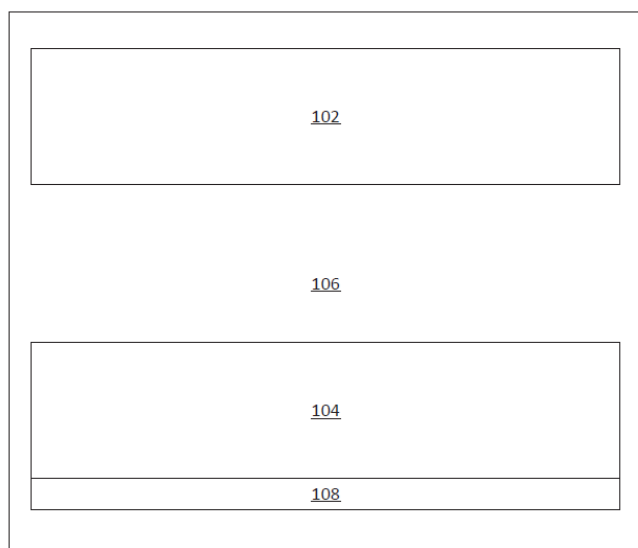
Для ілюстрації аспектів різних варіантів реалізації нижче наведені різні приклади. Приклад 1 Батарея, що містить: позитивний електрод; електроліт і негативний електрод, причому негативний електрод містить пористий метал. Приклад 2 Батарея за прикладом 1, в якій пористий метал був виготовлений щонайменше частково з використанням щонайменше одного летучого пороутворювача. Приклад 3 Батарея за будь-яким із прикладів 1-2, в якій пористий метал містить залізо. Приклад 4 Батарея за будь-яким із прикладів 2-3, в якій летучий пороутворювач являє собою відновлювач. Приклад 5 Батарея за прикладом 4, в якій відновлювач містить вуглець. Приклад 6 Батарея за будь-яким із прикладів 2-5, в якій летучий пороутворювач містить сульфат заліза (II), сульфат заліза (II, II), макінавіт, марказит, пірит, троїліт, піротин, грейгіт, аморфний сульфід заліза (II) або сульфід свинцю. Приклад 7 Батарея за будь-яким із прикладів 2-5, в якій летучий пороутворювач містить вугілля. Приклад 8 Батарея за будь-яким із прикладів 1-7, в якій пористий метал одержаний шляхом відновлення у подовій печі. Приклад 9 Батарея за прикладом 8, в якій подова піч являє собою піч з обертовим подом або піч з лінійним подом. Приклад 10 Батарея за будь-яким із прикладів 1-7, в якій пористий метал одержаний шляхом відновлення в обертовій сушильній печі. Приклад 11 Батарея за будь-яким із прикладів 1-7, в якій утворення пор у пористому металі відбувається шляхом електрохімічного відновлення у батареї. Приклад 12 Батарея за

прикладом 11, в якій летучий пороутворювач містить діоксид кремнію, силікат натрію, оксид натрію, оксид кальцію або оксид магнію. Приклад 13 Батарея за прикладом 11, в якій летучий пороутворювач містить сіль електроліту. Приклад 14 Батарея за прикладом 13, в якій летучий пороутворювач містить гідроксид калію або натрію. Приклад 15 Батарея за прикладом 11, в якій летучий пороутворювач містить нітрат амонію або сульфат калію. Приклад 16 Батарея за будь-яким із прикладів 2-15, в якій пористий метал утворений з матеріалу-попередника, що має перший розмір, причому розмір частинок летучого пороутворювача приблизно такий самий, як і перший розмір. Приклад 17 Батарея за будь-яким із прикладів 2-15, в якій пористий метал має шар продукту розряду на своїй поверхні, причому розмір частинок летучого пороутворювача перевищує у два рази товщину шару продукту розряду. Приклад 18 Батарея за будь-яким із прикладів 2-17, в якій щонайменше один летучий пороутворювач містить щонайменше два різних летучих пороутворювача. Приклад 19 Батарея за прикладом 18, в якій два різних летучих пороутворювача являють собою пороутворювачі різного типу та/або пороутворювачі різного розміру. Приклад 20 Батарея за будь-яким із прикладів 1-19, яка додатково містить струмознімач, що металургійно зв'язаний або має електричний зв'язок з негативним електродом, причому струмознімач розташований вздовж щонайменше частини негативного електрода. Приклад 21 Батарея за будь-яким із прикладів 1-19, в якій позитивний електрод містить катод, що споживає для своєї роботи повітря, електрод із оксигідроксиду нікелю або електрод із діоксиду марганцю. Приклад 22 Батарея за будь-яким із прикладів 3-21, в якій залізо містить сталеплавильний пил, прокатну окалину, залізну руду, залізну сітку, залізний дріт, залізний порошок або будь-яку їхню комбінацію. Приклад 23 Батарея за будь-яким із прикладів 2-22, в якій летучий пороутворювач містить кокс. Приклад 24 Батарея за будь-яким із прикладів 1-23, в якій пористий метал був виготовлений щонайменше частково з використанням пороутворювача, що містить карбонат металу. Приклад 25 Спосіб утворення пористого металу для негативного електрода батареї, який включає використання щонайменше одного летучого пороутворювача для утворення пор у пористому металі. Приклад 26 Спосіб за прикладом 25, у якому летучий пороутворювач являє собою летучий пороутворювач за будь-яким із прикладів 3-24, причому пори утворені на етапі відновлення або без нього. Приклад 27 Великомасштабна система зберігання енергії, яка містить: одну або більше батарей за будь-яким із прикладів 1-24. Приклад 28 Система тривалого зберігання енергії, яка виконана з можливістю втримання електричного заряду протягом щонайменше 24 годин, при цьому система містить одну або більше батарей за будь-яким із прикладів 1-24.

Вищевикладені описи способів наведені винятково в якості ілюстративних прикладів і не призначені для обмеження стадій різних варіантів реалізації винаходу з точки зору їх виконання у представленому порядку. Фахівцю в даній області техніки слід мати на увазі, що порядок виконання стадій у вищевикладених варіантах реалізації винаходу є довільним. Такі слова, як "після", "потім", "наступний" та т.д. не обов'язково призначені для обмеження порядку стадій; дані слова можуть бути використані для ознайомлення читача з описом способів. Крім того, будь-яке посилання на елементи формули винаходу в однині, наприклад з використанням артиклів "a", "an" або "the", не слід тлумачити як обмеження елемента одниною.

Крім того, будь-яка стадія будь-якого варіанта реалізації винаходу, зазначеного у даному документі, може використовуватися у будь-якому іншому варіанті реалізації винаходу. Попередній опис аспектів винаходу представлений, щоб дати будь-якому фахівцю в даній області техніки можливість створити або використовувати даний винахід. Різні модифікації даних аспектів очевидні фахівцям в даній області техніки, а загальні принципи, визначені у даному документі, застосовні до інших аспектів, не виходячи за межі обсягу даного винаходу. Таким чином, даний винахід не призначений для обмеження аспектами, зазначеними у даному документі, але повинен відповідати самому широкому обсягу, що узгоджується з принципами та новими характеристиками, розкритими у даному документі.

100

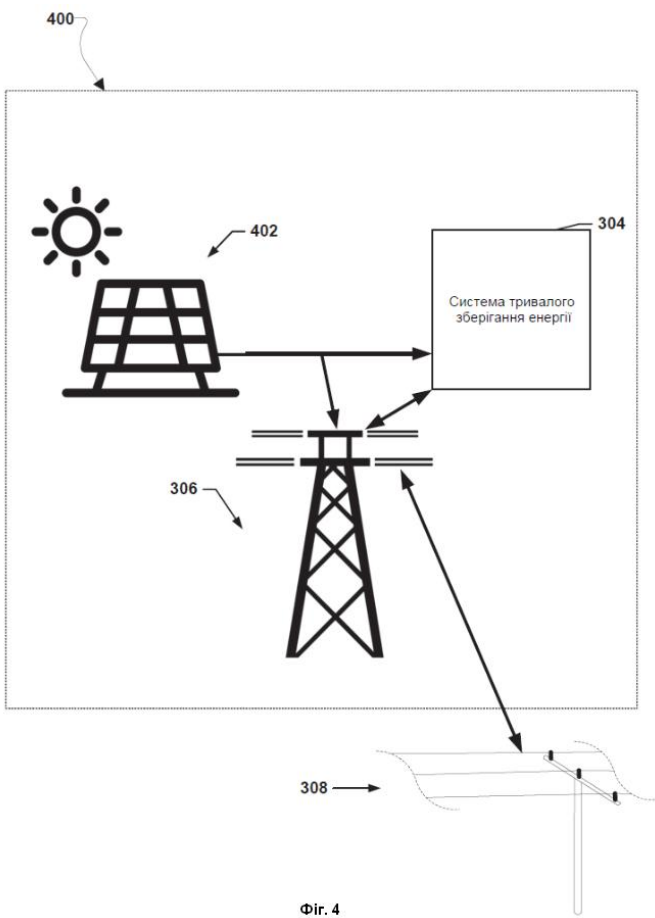
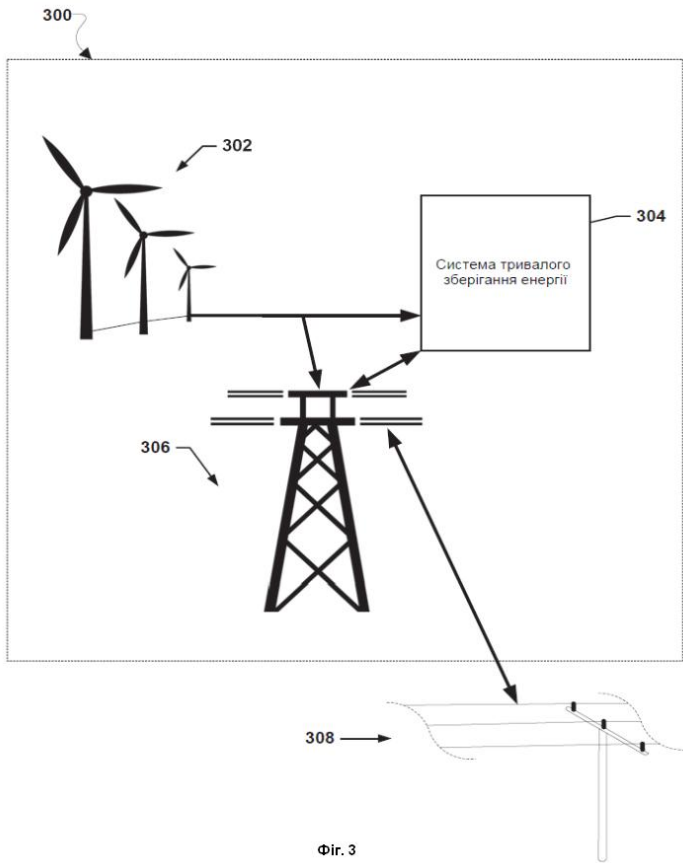


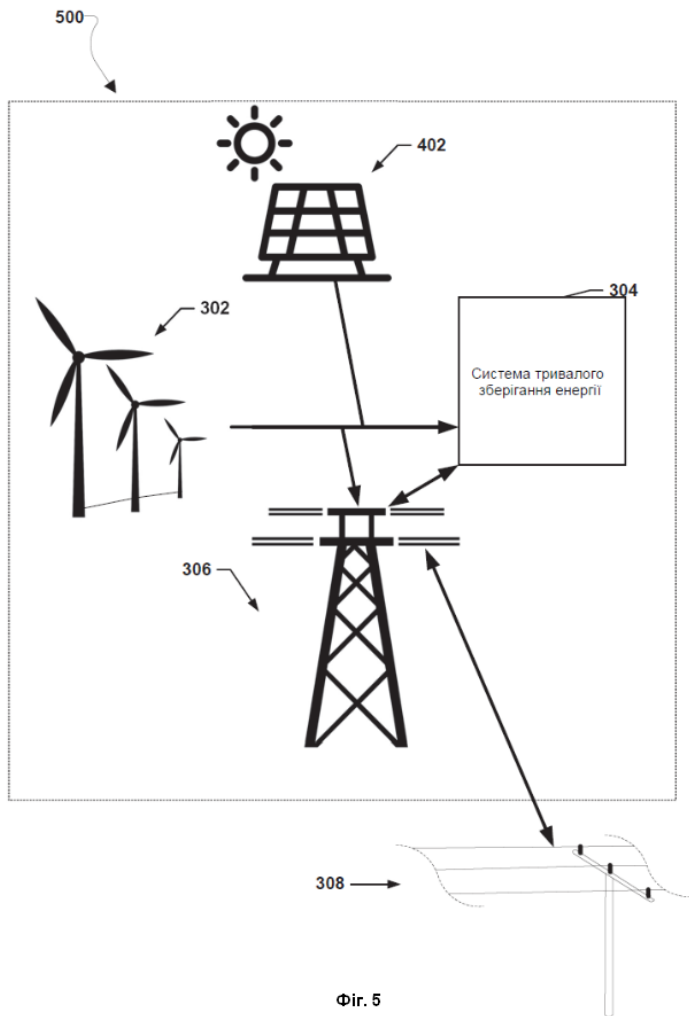
Фіг. 1

200

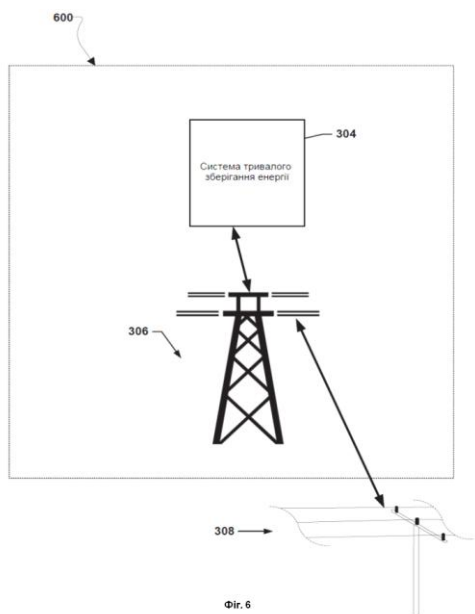


Фіг. 2

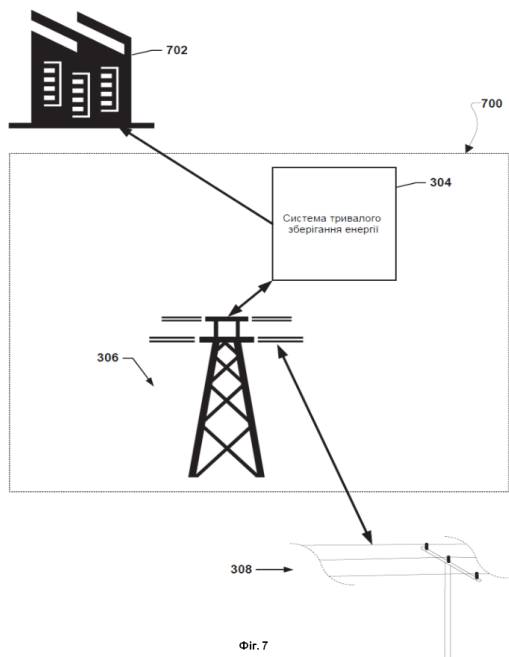




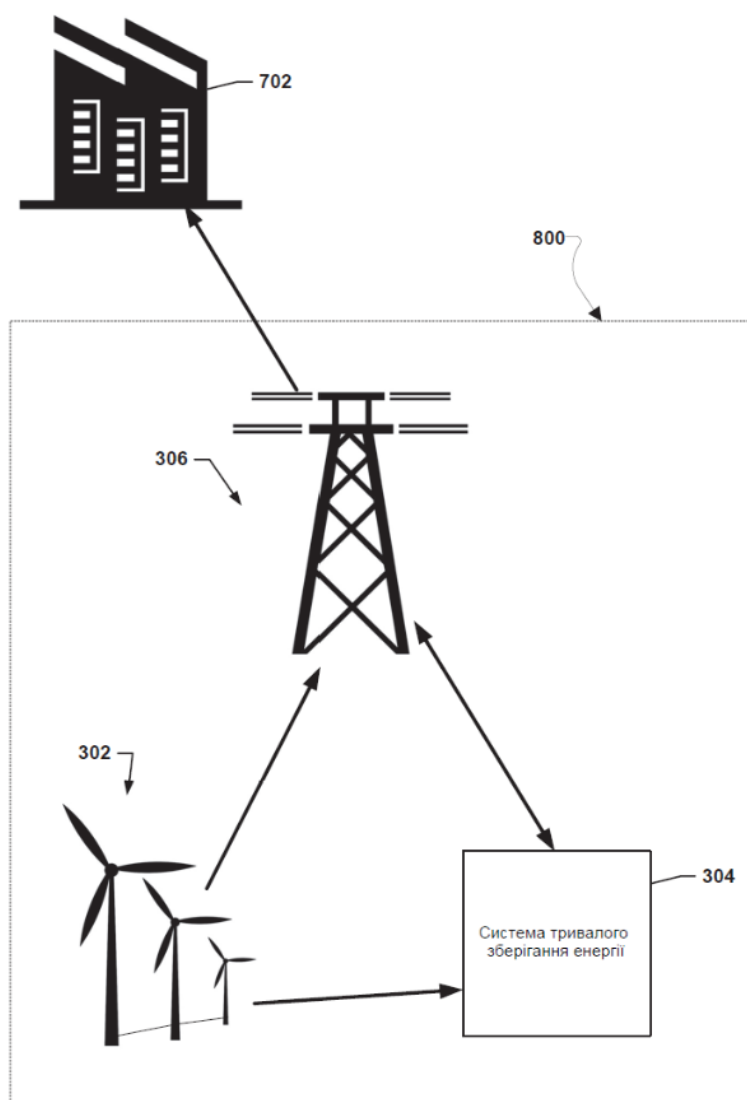
Фіг. 5



Фіг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8

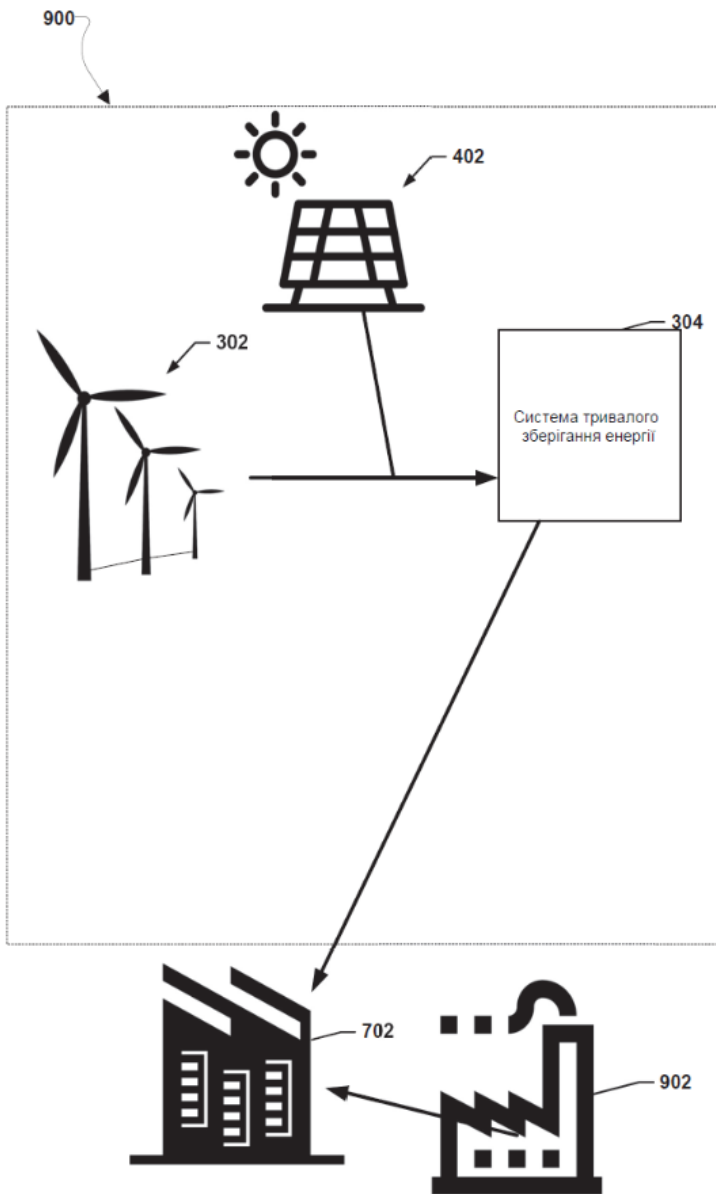


Fig. 9

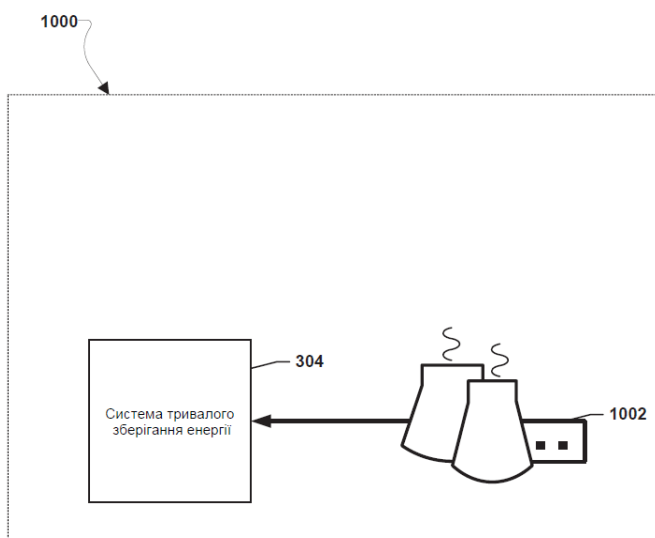
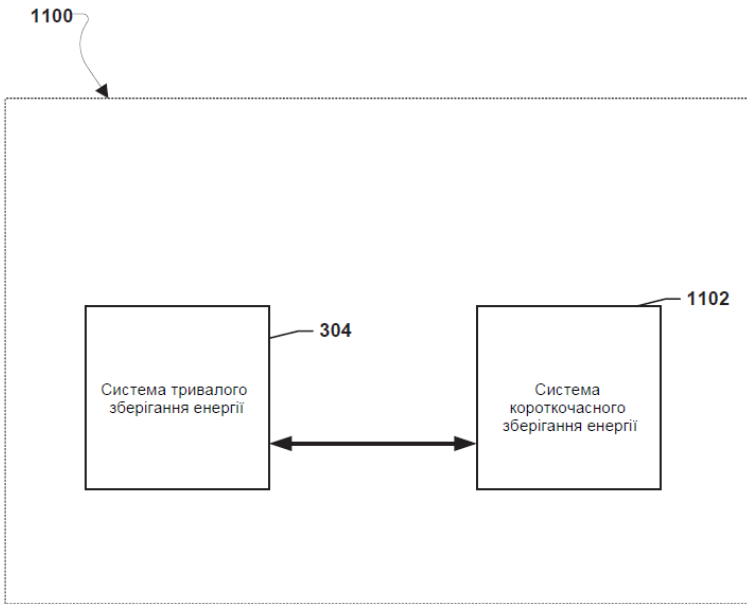


Fig. 10



Фиг. 11