

Układ do magazynowania energii elektrycznej wykorzystujący sprężarkowy obieg pompy ciepła oraz jego odwrotność stanowiącą obieg Rankine'a

Przedmiotem wynalazku jest układ do magazynowania energii elektrycznej wykorzystujący sprężarkowy obieg pompy ciepła oraz jego odwrotność stanowiącą obieg Rankine'a (czyli energetyczny obieg parowy zwany również obiegiem Clausiusa-Rankine'a).

Idea magazynowania energii elektrycznej znana jest w technice przynajmniej od XVIII wieku, czyli od czasów eksperymentów Benjamina Franklina. Od tego czasu powstało wiele technologii magazynowania energii elektrycznej. W ostatnich latach obserwuje się szeroko zakrojoną mobilizację wysiłków badawczych ukierunkowanych na udoskonalanie tych technologii. Wysiłki te związane są nie tylko z próbą elektryfikacji transportu, ale z próbą transformacji światowej energetyki z technologii wykorzystujących paliwa kopalne do technologii wykorzystujących odnawialne (ekologiczne) źródła energii – szczególnie w krajach rozwiniętych. Jednymi z najintensywniej rozwijanych odnawialnych technologii energetycznych są energetyka wiatrowa (turbiny wiatrowe) oraz energetyka słoneczna (panele fotowoltaiczne). Charakterystyczną cechą tych dwóch sposobów produkcji energii jest ich zależność od warunków pogodowych, a w konsekwencji stosunkowo słaba regulacyjność. Zastosowanie magazynów (zasobników) energii pozwala na drastyczną poprawę regulacyjności wspomnianych źródeł energii i przyczynia się do stabilizacji systemu elektroenergetycznego.

Istnieje wiele technologii magazynowania energii elektrycznej, które wykorzystują różne grupy zjawisk fizycznych oraz chemicznych. Znane grupy technologii magazynów energii są następujące [Energy Storage Monitor Latest trends in energy storage, World Energy Council]:

1. Technologie mechaniczne, do których należą między innymi: elektrownie szczytowo-pompowe; koła zamachowe; magazyny sprężonego powietrza (nieskojarzone z magazynami ciepła sprężania), CAES (z ang.: Compressed Air Energy Storage).
2. Technologie cieplne, między innymi: technologie wykorzystujące grzałki w procesie ładowania magazynu oraz silnik cieplny w procesie rozładowywania

magazynu; technologie wykorzystujące pompy ciepła w procesie ładowania magazynu oraz silnik cieplny w procesie rozładowywania magazynu. Anglojęzyczne akronimy stosowane zamiennie jako nazwa dla tej technologii są następujące: PTES (z ang.: Pumped Thermal Energy Storage) lub ETES (z ang.: „Electro-Thermal Energy Storage”); magazyny sprężonego powietrza skojarzone z magazynami ciepła sprężania – AA-CAES (z ang.: „Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage).

3. Chemiczne, między innymi: produkcja wodoru; produkcja metanu.
4. Technologie elektrochemiczne, między innymi: baterie litowo-jonowe; baterie kwasowo-ołowiowe; baterie sodowo-jonowe; baterie przepływowe.
5. Elektryczne, między innymi superkondensatory.

Znane są technologie PTES bazujące na obiegach parowych, czyli na sprężarkowym obiegu pompy ciepła do ładowania magazynu energii, natomiast do rozładowania magazynu energii wykorzystują obieg odwrotny, czyli obieg Rankine’a. Z opisu wynalazku US4089744 znana jest technologia PTES, w której czynnikiem roboczym sprężarkowej pompy ciepła oraz obiegu odwrotnego (Rankine’a) jest woda. W obiegu sprężarka pary wodnej jest wielostopniowa, a pomiędzy jej stopniami zachodzi oddawanie ciepła oraz chłodu. Ciepło oraz chłód magazynowane są w zbiornikach z cieczą. Cieczą magazynującą chłód jest woda, natomiast substancją magazynującą ciepło jest ciecz o wysokiej temperaturze wrzenia (np. olej termalny), który jest przechowywany w zbiornikach bezciśnieniowych. Dla obu magazynów – ciepła oraz chłodu – potrzebne są po dwa zbiorniki. W przypadku magazynu ciepła ciecz o niższej temperaturze pompowana jest przeciwnie do jednego bezciśnieniowego zbiornika, przez wymiennik ciepła odbierający ciepło od pompy ciepła i po ogrzaniu trafia do drugiego bezciśnieniowego zbiornika, w którym panuje wyższa temperatura. Magazynowanie chłodu odbywa się analogicznie – woda o wyższej temperaturze, znajdująca się w jednym ze zbiorników, jest pompowana przeciwnie do drugiego bezciśnieniowego zbiornika, przez wymiennik ciepła odbierając chłód (oddając ciepło) od pompy ciepła i po schłodzeniu trafia do drugiego ze zbiorników, w którym panuje niższa temperatura. Podczas rozładowywania magazynu ciepła proces jest odwracany.

Z opisów wynalazków EP2157317A2 oraz EP2698506A1 znane są technologie PTES, w których obieg sprężarkowej pompy ciepła oraz obieg odwrotny (Rankine’a) są

obiegami nadkrytycznymi. Czynnikiem roboczym korzystnie jest dwutlenek węgla. Magazyn ciepła stanowią zbiorniki z wodą (ciepło jawne wody). Podczas ładowania magazynu energii woda ze zbiornika o niższej temperaturze pompowana jest przeciwwąadowo przez wymiennik ciepła i odbiera ciepło od pompy ciepła a po ogrzaniu trafia do drugiego zbiornika, w którym panuje wyższa temperatura. Dla zwiększenia efektywności magazynu energii, zbiorników może być więcej. Dzięki tej modyfikacji możliwe jest przechowywanie ogrzanej wody na różnych poziomach temperaturowych. Jako magazyn chłodu stosuje się zbiornik, w którym znajduje się eutektyczna mieszanina wody z lodem, dzięki temu parownik pompy ciepła w trybie ładowania magazynu energii oraz skraplacz obiegu Rankine'a w trybie rozładowywania magazynu energii zachowują stałą różnicę temperatur w stosunku do magazynu chłodu. Zabieg ten ma pozytywny wpływ na sprawność magazynowania energii, ponieważ minimalizuje utratę energii podczas wymiany ciepła. W opisie wynalazku WO2011103306A1 ujawniono magazyn energii typu PTES, który jako magazyny ciepła i chłodu wykorzystuje materiały zmiennofazowe. W szczególności magazyn ten mógłby jako czynnik roboczy wykorzystywać znane substancje wykorzystywano jako czynniki chłodnicze lub czynniki przeznaczone do pomp ciepła. Z opisu wynalazku US10483826 znany jest magazyn typu PTES, w którym magazyn ciepła zawiera mieszaninę eutektyczną wody z lodem a magazyn chłodu, operujący w temperaturze -40°C lub mniejszej, wykorzystuje lód. Znane są technologie PETS wykorzystujące obiegi gazowe. Chłodniczy obieg gazowy (lub gazowy obieg pompy ciepła) nazywany jest odwróconym obiegiem Braytona lub obiegiem Bella-Colemana. Gazowy obieg generujący energię jest nazywany obiegiem Braytona lub obiegiem Braytona-Joula. Poniższe technologie magazynowania energii elektrycznej typu PTES wykorzystują te dwa obiegi. Do ładowania magazynu energii elektrycznej wykorzystywany jest gazowy obieg chłodniczy, natomiast do rozładowywania magazynu energii elektrycznej wykorzystywany jest gazowy obieg energetyczny. Z opisu wynalazku US20100257862A1 znany jest magazyn energii typu PTES, w którym jako magazyny ciepła oraz chłodu wykorzystuje się zbiorniki wypełnione ciałem stałym, które jest porowate lub sypkie, tzn. może przepływać przez nie gaz. Ciałami stałymi mogą być cząstki stałe lub włókna. Jako urządzenia sprężające i rozprężające stosuje się tłokową sprężarkę oraz tłokowy ekspander. W opisie wynalazku US20170159500A1 ujawniono gazowy obieg pompy ciepła wykorzystany do

podniesienia temperatury górnego źródła ciepła oraz obniżenia temperatury dolnego źródła ciepła. Jako nośnik ciepła w górnym źródle ciepła zaproponowano w szczególności stopioną sól (lub stopioną mieszaninę różnych soli). Ciecz (czyli np. stopiona sól), w trybie ładowania magazynu energii, pompowana jest przeciwnie przez wysokotemperaturowy wymiennik ciepła i ogrzewa się odbierając ciepło z pompy ciepła. Jako magazyn chłodu wykorzystuje się ciecz kriogeniczną (ciecz o niskiej temperaturze). Według opisanego rozwiązania, podczas ładowania magazynu energii elektrycznej, ciecz kriogeniczna o wyższej temperaturze pompowana jest przeciwnie przez wymiennik ciepła i oddaje ciepło do pompy ciepła. Po schłodzeniu ciecz kriogeniczna trafia do zbiornika, w którym panuje niższa temperatura. W trakcie rozładowywania magazynu energii elektrycznej proces ten jest odwracany. W opisie wynalazku WO2007096656A1 gazowy obieg chłodniczy wykorzystywany jest do wytwarzania skroplonego gazu, w szczególności skroplonego powietrza. W procesie odwrotnym wykorzystywany jest obieg Rankine'a – skroplona ciecz pompowana jest za pomocą pompy kriogenicznej do parownika (np. parownika atmosferycznego) i rozprężana w ekspanderze oddaje zmagazynowaną energię.

Układ do magazynowania energii elektrycznej wykorzystujący sprężarkowy obieg pompy ciepła oraz jego odwrotność stanowiącą obieg Rankine'a, według wynalazku, w których magazyn ciepła oraz magazyn chłodu zawierają po więcej niż jednym zbiorniku na ciecz, zawierający wymienniki ciepła połączone z pompami i zbiornikami, sprężarkę obiegu pompy ciepła połączoną z silnikiem elektrycznym oraz ekspander cieplny połączony z generatorem elektrycznym. Istota wynalazku polega na konfiguracji magazynów ciepła i chłodu. Dolne źródło ciepła w obu obiegach (sprężarkowym obiegu pompy ciepła i obiegu Rankine'a) składa się z trzech magazynów chłodu: pierwszego, drugiego i trzeciego. Każdy z trzech magazynów chłodu składa się z dwóch odpowiadających sobie zbiorników cieczy stanu rozładowania (pierwszego, drugiego i trzeciego) oraz stanu naładowania (pierwszego, drugiego i trzeciego), biorących udział w procesie ładowania lub rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej. Zbiorniki stanu rozładowania magazynów chłodu są zbiornikami cieczy, które magazynują ciecz potrzebną do naładowania magazynów chłodu i są pełne, gdy magazyny chłodu są rozładowane, natomiast są puste, jeśli magazyny chłodu są w pełni naładowane. Zbiorniki magazynów chłodu stanu naładowania to zbiorniki cieczy,

które stanowią właściwe magazyny chłodu. Są one pełne, jeśli magazyny chłodu są w pełni naładowane, puste są, jeśli magazyny chłodu są całkowicie rozładowane. Każda z par zbiorników magazynów chłodu połączona jest wzajemnie za pomocą odpowiedniego układu pompującego o rewersyjnym kierunku przepływu: pierwszego, drugiego i trzeciego oraz odpowiedniego wymiennika ciepła: pierwszego, drugiego oraz trzeciego. Układy pompujące magazynów chłodu podczas ładowania ustawione są tak, że ciecz ze zbiornika stanu rozładowania magazynu chłodu (np. pierwszego) przepływa przez odpowiedni wymiennik ciepła (np. pierwszy) i trafia do sparowanego z nim zbiornika stanu naładowania (np. pierwszego). Podczas rozładowywania magazynów chłodu układy pompujące tych magazynów ustawione są tak, że ciecz ze zbiornika stanu naładowania przepływa przez odpowiedni wymiennik ciepła i trafia do zbiornika stanu rozładowania. Wymienniki magazynów chłodu są kolejno połączone ze sobą i łącznie stanowią podgrzewacz, parownik i przegrzewacz w obiegu sprężarkowej pompy ciepła oraz jednocześnie schładzacz, skraplacz i przechładzacz w obiegu Rankine'a. Podczas ładowania magazynów chłodu ciepło wymieniane w wymiennikach ciepła (pierwszym, drugim i trzecim) przepływa z magazynów chłodu do czynnika roboczego sprężarkowej pompy ciepła. Podczas rozładowywania magazynów chłodu ciepło wymieniane w wymiennikach ciepła (pierwszym, drugim i trzecim) przepływa z czynnika roboczego obiegu Rankine'a do magazynów chłodu. Górne źródło ciepła obu obiegów składa się z trzech magazynów ciepła: czwartego, piątego i szóstego. Każdy z trzech magazynów ciepła składa się z dwóch odpowiadających sobie zbiorników cieczy stanu rozładowania (czwartego, piątego i szóstego) i stanu naładowania (czwartego, piątego i szóstego). Zbiorniki magazynów ciepła stanu rozładowania to zbiorniki cieczy, które magazynują ciecz potrzebną do naładowania magazynów ciepła. Zbiorniki te są pełne, gdy magazyny ciepła są rozładowane, a puste są, jeśli magazyny ciepła są naładowane. Zbiorniki stanu naładowania magazynów ciepła to zbiorniki cieczy, które stanowią właściwe magazyny ciepła. Zbiorniki te są pełne, jeśli magazyny ciepła są naładowane, a puste są, jeśli magazyny ciepła są rozładowane. Każda z par zbiorników magazynów ciepła połączona jest wzajemnie za pomocą odpowiedniego układu pompującego o rewersyjnym kierunku przepływu: czwartego, piątego i szóstego oraz odpowiedniego wymiennika ciepła: czwartego, piątego oraz szóstego. Układy pompujące magazynów ciepła podczas ładowania ustawione są tak, że ciecz ze zbiornika stanu rozładowania magazynu ciepła

(np. trzeciego) przepływa przez odpowiedni wymiennik ciepła (np. trzeci) i trafia do sparowanego z nim zbiornika stanu naładowania (np. trzeciego). Podczas rozładowywania magazynów ciepła układy pompujące tych magazynów ustawione są tak, że ciecz ze zbiornika stanu naładowania przepływa przez odpowiedni wymiennik ciepła i trafia do zbiornika stanu rozładowania. Wymienniki magazynów ciepła są kolejno połączone ze sobą i łącznie stanowią schładzacz, skraplacz i przechładzacz w obiegu sprężarkowej pompy ciepła oraz jednocześnie podgrzewacz, parownik i przegrzewacz w obiegu Rankine'a. Podczas ładowania magazynów ciepła ciepło wymieniane w wymiennikach ciepła (czwartym, piątym i szóstym) przepływa z czynnika roboczego sprężarkowej pompy ciepła do magazynów ciepła. Podczas rozładowywania magazynów ciepła ciepło wymieniane w wymiennikach ciepła (czwartym, piątym i szóstym) przepływa z magazynów ciepła do czynnika roboczego obiegu Rankine'a. Sprężarka (sprężająca parę czynnika roboczego, pracuje podczas ładowania układu magazynującego energię elektryczną i jest napędzana silnikiem elektrycznym sprężarki, który jest zasilany energią elektryczną dostarczaną do układu do magazynowania energii elektrycznej). Ekspander cieplny (turbina obiegu Rankine'a, rozpręża parę czynnika roboczego w obiegu Rankine'a i napędza generator elektryczny turbiny, pracuje podczas rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej). Sprężarka oraz ekspander cieplny połączone są z jednej strony z trzecim wymiennikiem ciepła, a z drugiej strony z czwartym wymiennikiem ciepła. Natomiast szósty magazyn ciepła połączony jest z pierwszym układem bilansowania temperatury, który w etapie rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej pozwala na konieczną regulację temperatury w szóstym magazynie. Trzeci magazyn chłodu połączony jest z drugim układem do bilansowania temperatury, który w etapie rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej pozwala na konieczną regulację temperatury w trzecim magazynie chłodu. Pierwszy wymiennik ciepła połączony jest ze zbiornikiem czynnika roboczego obu obiegów, w którym znajduje się mieszanina zeotropowa przynajmniej dwóch różnych substancji mogących tworzyć taką mieszaninę. Substancjami tymi mogą być w szczególności organiczne związki chemiczne tworzące mieszaniny zeotropowe. Zbiornik czynnika roboczego połączony jest z pompą czynnika roboczego (która podnosi ciśnienie tego czynnika i pracuje podczas rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej) napędzaną silnikiem elektrycznym

pompy czynnika roboczego przy pracy obiegu Rankine'a i z ekspanderem cieczowym (odzyskuje energię ciśnienia cieczy czynnika w obiegu sprężarkowej pompy ciepła i pracuje podczas ładowania układu do magazynowania energii elektrycznej) napędzającym generator elektryczny ekspandera cieczowego. Pompa czynnika roboczego oraz ekspander cieczowy mogą być, w szczególnym przypadku, jednym urządzeniem (pompująco-rozprężnym), które, w zależności od trybu pracy układu do magazynowania energii elektrycznej (ładowanie lub rozładowywanie) zmienia swój kierunek obrotów. W takim przypadku silnik elektryczny pompy czynnika roboczego oraz generator elektryczny ekspandera cieczowego również są tym samym urządzeniem elektrycznym (silniko-generatorem), który zmienia swój tryb pracy w zależności od trybu pracy (ładowanie lub rozładowywanie) układu do magazynowania energii elektrycznej. Pompa czynnika roboczego oraz ekspander cieczowy połączone są z szóstym wymiennikiem ciepła. Pompa czynnika roboczego jest napędzana silnikiem elektrycznym, który zasilany jest energią elektryczną, która zmniejsza energię elektryczną oddawaną z układu do magazynowania energii elektrycznej podczas rozładowywania. Generator elektryczny odbiera energię mechaniczną z turbiny w obiegu Rankine'a i oddaje energię elektryczną z układu do magazynowania energii elektrycznej podczas jego rozładowywania. Elementy układu według wynalazku połączone są ze sobą rurociągami. Stan napełnienia poszczególnych zbiorników magazynów ciepła i chłodu zależy od stopnia naładowania układu do magazynowania energii elektrycznej.

W etapie ładowania układu do magazynowania energii elektrycznej energia ta zasila silnik elektryczny napędzający (poprzez wał) sprężarkę będącą elementem pompy ciepła. W rezultacie, pompa ciepła, na skutek wytworzonej różnicy temperatur, konwertuje dostarczoną energię elektryczną na energię ciepła oraz energię chłodu. Według wynalazku energia cieplna odebrana z pompy ciepła magazynowana jest w magazynach ciepła (czwartym, piątym i szóstym) w postaci ciepła jawnego zawartego w cieczy. Energia chłodu odebrana z pompy ciepła magazynowana jest w magazynach chłodu (pierwszym, drugim i trzecim) w postaci chłodu jawnego zawartego w cieczy. Magazyny ciepła zawierają zbiorniki stanu naładowania wypełnione ogrzaną cieczą (czwarty, piąty i szósty). Magazyny chłodu zawierają zbiorniki stanu naładowania wypełnione schłodzoną cieczą (pierwszy, drugi i trzeci).

W etapie rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej (odzyskiwania energii) wykorzystywany jest obieg Rankine'a (energetyczny obieg parowy), który jako górne źródło ciepła wykorzystuje magazyny ciepła (czwarty, piąty i szósty) oraz jako dolne źródło ciepła (chłodnicę) wykorzystuje magazyny chłodu (pierwszy, drugi i trzeci). Ekspander cieplny będący elementem obiegu Rankine'a (obiegu parowego), napędza (poprzez wał) generator elektryczny. Tym samym energia elektryczna jest odbierana z układu do magazynowania energii elektrycznej.

Układ do magazynowania energii elektrycznej może być zasilany np. z odnawialnych źródeł energii jak np. turbiny wiatrowe i może oddawać energię do sieci elektroenergetycznej.

Korzystnie w magazynach chłodu zbiorniki cieczy stanu rozładowania mają takie same objętości jak odpowiadające im zbiorniki cieczy stanu naładowania. Korzystnie w magazynach ciepła zbiorniki cieczy stanu rozładowania mają takie same objętości jak odpowiadające im zbiorniki cieczy stanu naładowania. Korzystnie pierwszy układ bilansowania temperatury stanowi agregat chłodniczy lub chłód odpadowy lub chłodnia wentylatorowa. Korzystnie drugi układ bilansowania temperatury stanowi dodatkowa pompa ciepła lub zawór bajpasowy lub ciepło odpadowe. Korzystnie sprężarkę obiegu pompy ciepła stanowi sprężarka przepływowa lub objętościowa. Korzystnie ciecz magazynującą energię ciepła i chłodu stanowi woda. Korzystnie ekspander cieplny obiegu Rankine'a stanowi turbina cieplna lub ekspander objętościowy. Korzystnie wymienniki ciepła stanowią wymienniki płytowe i/lub płaszczowo-rurowe i/lub płaszczowo-płytowe. Korzystnie obieg Rankine'a stanowi organiczny obieg Rankine'a. Układ według wynalazku wykorzystuje sprężarkowy obieg pompy ciepła oraz jego odwrotność stanowiącą obieg Rankine'a przy zasadniczo podkrytycznej i niskotemperaturowej pracy tych obiegu oraz minimalizacji strat energii w procesach ładowania i rozładowywania magazynowanej energii.

Zaletą wynalazku jest to, że w odróżnieniu od znanych ze stanu techniki rozwiązań charakteryzuje się bliskim dopasowaniem temperatur magazynów chłodu oraz magazynów ciepła do temperatur pracy sprężarkowej pompy ciepła oraz do temperatur pracy jej obiegu odwrotnego, czyli obiegu Rankine'a. Bliskie dopasowanie temperatur zostało umożliwione poprzez zastosowanie trzech magazynów chłodu oraz trzech magazynów ciepła i zastosowanie mieszaniny zeotropowej przynajmniej dwóch

substancji jako czynnika roboczego sprężarkowej pompy ciepła oraz obiegu Rankine'a. Dzięki zastosowaniu mieszaniny zeotropowej jako czynnika roboczego obiegu sprężarkowej pompy ciepła oraz obiegu Rankine'a, proces parowania oraz skraplania w obu obiegach odbywa się w zmiennej temperaturze. Możliwe jest zatem, przy wykorzystaniu przeciwprądowych wymienników ciepła, odebranie oraz dostarczenie ciepła i chłodu z oraz do czynnika roboczego jako ciepła i chłodu jawnego cieczy magazynującej ciepło i chłód. Fakt ten sprawia, że zbiorniki cieczy magazynującej ciepło i chłód mogą mieć prostą konstrukcję (w przeciwieństwie do magazynów ciepła i chłodu wykorzystujących materiały zmiennofazowe). Zaletą wynalazku jest również fakt, że cieczą magazynującą zarówno ciepło, jak i chłód może być woda, która jest substancją taną, dostępną i nietoksyczną. Zaletą wynalazku jest również to, że nawet przy stosunkowo niskich temperaturach magazynów ciepła (poniżej 100 °C) i przy stosunkowo wysokich temperaturach magazynów chłodu (powyżej 0 °C) możliwe jest osiągnięcie wysokich sprawności magazynowania energii elektrycznej (nawet powyżej 60%) – w przeciwieństwie do np. magazynów energii typu PTES wykorzystujących obiegi Braytona, które wymagają znacznie wyższych temperatur. Zaletą wynalazku jest fakt, że ze względu na stosunkowo niskie temperatury magazynów ciepła, możliwe jest wykorzystanie tanich i dostępnych materiałów lub elementów (np. płytowych wymienników ciepła). Zaletą wynalazku jest także fakt, że pracuje on przy stosunkowo niskich ciśnieniach czynnika roboczego, w przeciwieństwie do np. układów wykorzystujących nadkrytyczne obiegi CO₂. Zaletą wynalazku jest również fakt, że jako układ do magazynowania energii elektrycznej jest skalowalny w zakresie mocy od kilku kilowatów do kilku megawatów lub więcej oraz w zakresie pojemności od kilku kilowatogodzin do kilku megawatogodzin lub więcej. Zaletą wynalazku jest to, że jako układ do magazynowania energii elektrycznej nie wymaga specjalnego ukształtowania terenu (jak np. elektrownie szczytowo-pompowe).

Wynalazek jest bliżej przedstawiony w poniższych przykładach wykonania i na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia szczegółowy schemat układu do magazynowania energii elektrycznej, Fig. 2 przedstawia schemat układu do magazynowania energii elektrycznej podczas ładowania, Fig. 3 przedstawia schemat układu do magazynowania energii elektrycznej podczas rozładowywania, Fig. 4 przedstawia bilanse wymienników ciepła podczas ładowania, Fig. 5 przedstawia bilanse wymienników ciepła podczas

rozładowywania, Fig. 6 przedstawia obiegi sprężarkowej pompy ciepła oraz obiegu Rankine'a w układzie temperatura-entropia, Fig. 7 przedstawia schemat turbomaszyny dwukierunkowej, Fig. 8 przedstawia układ do magazynowania energii elektrycznej z turbomaszyną dwukierunkową, Fig. 9 przedstawia schemat magazynów ciepła oraz chłodu przy wykorzystaniu zbiorników pływających, Fig. 10 przedstawia uproszczony schemat układu do magazynowania energii elektrycznej.

Przykład I

Układ 1 do magazynowania energii elektrycznej wykorzystujący sprężarkowy obieg pompy ciepła 2 oraz jego odwrotność stanowiącą obieg Rankine'a 3, w którym dolne źródło ciepła w obu obiegach składa się z trzech magazynów chłodu: pierwszego Z1, drugiego Z2 i trzeciego Z3. Każdy z magazynów chłodu Z1, Z2, Z3 składa się z dwóch połączonych ze sobą zbiorników cieczy stanu rozładowania: pierwszego Z1a, drugiego Z2a, trzeciego Z3a i stanu naładowania: pierwszego Z1b, drugiego Z2b, trzeciego Z3b. W każdej parze zbiorników Z1a-Z1b, Z2a- Z2b, Z3a- Z3b zbiorniki mają tą samą objętość. Pary zbiorników magazynów chłodu Z1a-Z1b, Z2a- Z2b, Z3a- Z3b połączone są wzajemnie za pomocą odpowiedniego układu pompującego o rewersyjnym kierunku przepływu: pierwszego CP1, drugiego CP2 i trzeciego CP3, oraz odpowiedniego wymiennika ciepła: pierwszego W1, drugiego W2 oraz trzeciego W3. Pierwszy W1, drugi W2 i trzeci W3 wymienniki ciepła są kolejno połączone ze sobą i łącznie stanowią podgrzewacz, parownik i przegrzewacz w obiegu sprężarkowej pompy ciepła 2 oraz jednocześnie schładzacz, skraplacz i przechładzacz w obiegu Rankine'a 3. Cieczą w magazynach chłodu pierwszym Z1, drugim Z2, trzecim Z3 jest woda. Górne źródło ciepła w obu obiegach składa się z trzech magazynów ciepła: czwartego Z4, piątego Z5 i szóstego Z6. Każdy z magazynów ciepła Z4, Z5, Z6 składa się z dwóch odpowiadających sobie zbiorników cieczy stanu rozładowania: czwartego Z4a, piątego Z5a, szóstego Z6a i stanu naładowania: czwartego Z4b, piątego Z5b, szóstego Z6b. W każdej parze zbiorników Z3a-Z3b, Z4a- Z4b, Z5a- Z5b zbiorniki mają tą samą objętość. Cieczą w magazynach ciepła czwartym Z4, piątym Z5 i szóstym Z6 jest woda. Pary zbiorników Z3a-Z3b, Z4a- Z4b, Z5a- Z5b magazynów ciepła połączone są wzajemnie za pomocą odpowiedniego układu pompującego o rewersyjnym kierunku przepływu: czwartego CP4, piątego CP5 i szóstego CP6, oraz z odpowiednim wymiennikiem ciepła: czwartym W4, piątym W5 oraz szóstym W6. Czwarty W4, piąty

W5 i szósty W6 wymienniki ciepła połączone są kolejno ze sobą i łącznie stanowią schładzacz, skraplacz i przechładzacz w obiegu sprężarkowej pompy ciepła 2 oraz jednocześnie podgrzewacz, parownik i przegrzewacz w obiegu Rankine'a 3. Sprężarka C i ekspander cieplny T połączone są z jednej strony z trzecim wymiennikiem ciepła W3, a z drugiej strony z czwartym wymiennikiem ciepła W4. Sprężarka C napędzana jest silnikiem MC, natomiast ekspander cieplny połączony jest z generatorem elektrycznym GT. Szósty magazyn ciepła Z6 połączony jest z pierwszym układem bilansowania temperatury TB6 (układem tym może być agregat chłodniczy, chłód odpadowy, chłodnia wentylatorowa itp.). Trzeci magazyn chłodu Z3 połączony jest z drugim układem do bilansowania temperatury TB3 (układem tym może być pompa ciepła, zawór bajpasowy, ciepło odpadowe itp.). Pierwszy wymiennik ciepła W1 połączony jest ze zbiornikiem ZC czynnika roboczego obu obiegów. Czynnik roboczy stanowi mieszanina zeotropowa dwóch substancji: trans-1-chloro-3,3,3-trifluoropropanu (R1233zd) oraz 2,3,3,3-tetrafluoropropenu (R1234yf) w stosunku masowym 50%/50%. Zbiornik ZC czynnika roboczego połączony jest z pompą FP czynnika roboczego napędzaną silnikiem MP przy pracy obiegu Rankine'a 3 i ekspanderem cieczowym LT napędzającym generator elektryczny GLT przy pracy obiegu sprężarkowej pompy ciepła 2. Pompa FP czynnika roboczego oraz ekspander cieczowy LT połączone są z szóstym wymiennikiem ciepła W6. Poszczególne elementy układu do magazynowania energii elektrycznej połączone są rurociągami. Rurociąg 0c łączy ekspander cieczowy LT ze zbiornikiem ZC cieczy roboczej. Rurociągi 1c oraz 1t łączą zbiornik ZC z pierwszym wymiennikiem ciepła W1. Rurociąg 12l łączy pierwszy wymiennik ciepła W1 z drugim wymiennikiem ciepła W2. Rurociąg 12v łączy drugi wymiennik ciepła W2 z trzecim wymiennikiem ciepła W3. Rurociąg 2c łączy trzeci wymiennik ciepła W3 ze sprężarką C. Rurociąg 3c łączący sprężarkę C z wymiennikiem ciepła W4. Rurociąg 34v łączy czwarty wymiennik ciepła W4 z piątym wymiennikiem ciepła W5. Rurociąg 34l łączy piąty wymiennik ciepła W5 z szóstym wymiennikiem ciepła W6. Rurociąg 4c łączy szósty wymiennik ciepła W6 z ekspanderem cieczowym LT. Rurociąg W1a łączy zbiornik pierwszego magazynu chłodu stanu rozładowania (Z1a) z pierwszym wymiennikiem ciepła W1. Rurociąg W1b łączy pierwszy wymiennik ciepła W1 z pierwszym układem pompującym CP1 oraz zbiornikiem stanu naładowania pierwszego magazynu (Z1b). Rurociąg W2a łączy zbiornik stanu rozładowania drugiego magazynu chłodu (Z2a) z drugim wymiennikiem

ciepła W2. Rurociąg W2b łączy drugi wymiennik ciepła W2 z drugim układem pompującym CP2 oraz ze zbiornikiem stanu naładowania drugiego magazynu chłodu Z2b. Rurociąg W3a łączy zbiornik stanu rozładowania trzeciego magazynu chłodu Z3a z trzecim wymiennikiem ciepła W3. Rurociąg W3b łączy trzeci wymiennik ciepła W3 z trzecim układem pompującym CP3 oraz ze zbiornikiem stanu naładowania trzeciego magazynu chłodu Z3b. Rurociąg W4a łączy zbiornik stanu rozładowania czwartego magazynu ciepła Z4a z czwartym wymiennikiem ciepła W4. Rurociąg W4b łączy czwarty wymiennik ciepła W4 z czwartym układem pompującym CP4 oraz ze zbiornikiem stanu naładowania czwartego magazynu ciepła Z4b. Rurociąg W5a łączy zbiornik stanu rozładowania piątego magazynu ciepła Z5a z piątym wymiennikiem ciepła W5. Rurociąg W5b łączy piąty wymiennik ciepła W5 z piątym układem pompującym CP5 oraz ze zbiornikiem stanu naładowania piątego magazynu ciepła Z5b. Rurociąg W6a łączy zbiornik stanu rozładowania szóstego magazynu ciepła Z6a z szóstym wymiennikiem ciepła W6. Rurociąg W6b łączy szósty wymiennik ciepła W6 z szóstym układem pompującym CP6 oraz ze zbiornikiem stanu naładowania szóstego magazynu ciepła Z6b. Rurociąg 0t łączy zbiornik czynnika roboczego ZC z pompą FP czynnika roboczego. Rurociąg 4t łączy pompę FP czynnika roboczego z szóstym wymiennikiem ciepła W6. Rurociąg 3t łączy czwarty wymiennik ciepła W4 z ekspanderem cieplnym T. Rurociąg 2t łączy ekspander cieplny T z trzecim wymiennikiem ciepła W3.

W poniższym opisie działania układu według wynalazku symbole poszczególnych rurociągów zastosowano jako indeksy temperatur i ciśnień w poszczególnych przekrojach kontrolnych, dodatkowo indeks „c” wskazuje stan ładowania układu do magazynowania energii elektrycznej natomiast indeks „t” wskazuje stan rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej (np. temperatura w rurociągu 1c to T1c, temperatura w rurociągu 12l podczas ładowania układu do magazynowania energii elektrycznej to T12lc, temperatura w rurociągu 34l podczas rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej to T34lt itd.).

Ładowanie układu do magazynowania energii elektrycznej.

Podczas ładowania układu do magazynowania energii elektrycznej 1 energia elektryczna dostarczana ze źródła 4 jest wykorzystywana do zasilania sprężarkowej pompy ciepła 2. Sprężarkowa pompa ciepła 2 wymusza przepływ ciepła z trzech magazynów chłodu Z1, Z2 i Z3, dzięki czemu temperatura cieczy w magazynach chłodu Z1, Z2 i Z3 ulega

obniżeniu. Temperatury cieczy w magazynach chłodu Z1, Z2 i Z3 różnią się od siebie w taki sposób, że temperatura cieczy w pierwszym magazynie chłodu Z1 jest niższa od temperatury cieczy w drugim magazynie chłodu Z2, która jest niższa od temperatury cieczy w trzecim magazynie chłodu Z3. Ciepło pobierane z magazynów chłodu Z1, Z2 i Z3 przepływa, poprzez działanie sprężarkowej pompy ciepła 2, do magazynów ciepła Z4, Z5 i Z6. Tym samym temperatury cieczy w magazynach ciepła Z4, Z5 i Z6 podnoszą się. Temperatury cieczy w magazynach ciepła Z4, Z5 i Z6 różnią się od siebie w taki sposób, że temperatura cieczy w czwartym magazynie ciepła Z4 jest wyższa od temperatury cieczy w piątym magazynie ciepła Z5, która jest wyższa od temperatury cieczy w szóstym magazynie ciepła Z6.

Proces ładowania układu do magazynowania energii elektrycznej 1 przebiega tak, że czynnik roboczy w postaci przechłodzonej cieczy o temperaturze T_{1c} przepływa ze zbiornika ZC czynnika roboczego do pierwszego wymiennika ciepła W1. Ciecz magazynująca chłód o temperaturze $T_{w1a} > T_{1c}$ pobierana jest (przez pierwszy układ pompujący CP1) ze zbiornika stanu rozładowania pierwszego magazynu chłodu Z1a i pompowana jest przeciwnie przez drugą stronę pierwszego wymiennika ciepła W1. Z powodu różnicy temperatur T_{w1a} oraz T_{1c} w pierwszym wymienniku ciepła W1 następuje przepływ strumienia ciepła z cieczy pobranej ze zbiornika stanu rozładowania pierwszego magazynu chłodu Z1a do czynnika roboczego. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym pompy ciepła 2 a cieczą ze zbiornika stanu rozładowania pierwszego magazynu chłodu Z1a za pierwszym wymiennikiem ciepła W1 temperatura cieczy z tego zbiornika Z1a ulega zmniejszeniu do temperatury T_{w1b} . Schłodzona ciecz ze zbiornika stanu rozładowania pierwszego magazynu chłodu Z1a trafia, poprzez pierwszy układ pompujący CP1 do zbiornika stanu naładowania pierwszego magazynu chłodu Z1b. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje ogrzanie czynnika roboczego do temperatury nasycenia T_{12c} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 5. Następnie, ogrzany czynnik roboczy w postaci cieczy nasyconej o temperaturze T_{12c} przepływa rurociągiem 12l do drugiego wymiennika ciepła W2. Ciecz magazynująca chłód o temperaturze $T_{w2a} > T_{12c}$ pobierana jest (przez drugi układ pompujący CP2) ze zbiornika stanu rozładowania drugiego magazynu chłodu Z2a i pompowana jest przeciwnie przez drugą stronę drugiego wymiennika ciepła W2. Z powodu różnicy temperatur T_{w2a} oraz T_{12c} w drugim wymienniku ciepła W2

następuje przepływ strumienia ciepła z cieczy pobranej ze zbiornika stanu rozładowania drugiego magazynu chłodu Z2a do czynnika roboczego. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym pompy ciepła 2 a cieczą ze zbiornika stanu rozładowania drugiego magazynu chłodu Z2a za drugim wymiennikiem ciepła W2 temperatura cieczy z tego zbiornika Z2a ulega zmniejszeniu do temperatury T_{w2b} . Schłodzona ciecz ze zbiornika stanu rozładowania drugiego magazynu chłodu Z2a trafia, poprzez drugi układ pompujący CP2 do zbiornika stanu naładowania drugiego magazynu chłodu Z2b. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje odparowanie, w zmiennej temperaturze, cieczy czynnika roboczego do temperatury nasycenia T_{12vc} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 4. Kolejno, czynnik roboczy w postaci pary nasyconej o temperaturze T_{12vc} przepływa rurociągiem 12v do trzeciego wymiennika ciepła W3. Ciecz magazynująca chłód o temperaturze $T_{w3a} > T_{12vc}$ pobierana jest (przez trzeci układ pompujący CP3) ze zbiornika stanu rozładowania trzeciego magazynu chłodu Z3a i pompowana jest przeciwwprądowo przez drugą stronę trzeciego wymiennika ciepła W3. Z powodu różnicy temperatur T_{w3a} oraz T_{12vc} w trzecim wymienniku W3 następuje przepływ strumienia ciepła z cieczy pobranej ze zbiornika stanu rozładowania trzeciego magazynu chłodu Z3a do czynnika roboczego. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym pompy ciepła 2 a cieczą ze zbiornika stanu rozładowania trzeciego magazynu chłodu Z3a za trzecim wymiennikiem ciepła W3 temperatura cieczy z tego zbiornika Z3a ulega zmniejszeniu do temperatury T_{w3b} . Schłodzona ciecz ze zbiornika stanu rozładowania trzeciego magazynu chłodu Z3a trafia, poprzez trzeci układ pompujący CP3 do zbiornika stanu naładowania trzeciego magazynu chłodu Z3b. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje przegrzanie pary czynnika roboczego do temperatury T_{2c} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 4. Strumień czynnika roboczego trafia rurociągiem 2c na wlot sprężarki C. Na skutek dostarczania energii elektrycznej ze źródła 4 do silnika elektrycznego MC napędzającego sprężarkę C następuje sprężanie pary przegrzanej czynnika roboczego o temperaturze T_{2c} od ciśnienia p_{2c} do ciśnienia p_{3c} . Sprężaniu towarzyszy również wzrost temperatury pary czynnika roboczego do temperatury T_{3c} . Następnie, para czynnika roboczego trafia z wylotu sprężarki C do czwartego wymiennika ciepła W4. Ciecz magazynująca ciepło o temperaturze $T_{w4a} < T_{3c}$ pobierana jest (przez czwarty układ pompujący CP4) ze zbiornika stanu rozładowania czwartego magazynu ciepła Z4a i pompowana jest

przeciwprądowo przez drugą stronę czwartego wymiennika ciepła W4. Z powodu różnicy temperatur T_{w4a} oraz T_{3c} w czwartym wymienniku ciepła W4 następuje przepływ strumienia ciepła z czynnika roboczego do cieczy pobranej ze zbiornika stanu rozładowania czwartego magazynu ciepła Z4a. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym pompy ciepła 2 a cieczą ze zbiornika stanu rozładowania czwartego magazynu ciepła Z4a za czwartym wymiennikiem ciepła W4 temperatura cieczy z tego zbiornika Z4a ulega zwiększeniu do temperatury T_{w4b} . Ogrzana ciecz ze zbiornika stanu rozładowania czwartego magazynu ciepła Z4a trafia, poprzez czwarty układ pompujący CP4 do zbiornika stanu naładowania czwartego magazynu ciepła Z4b. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje schłodzenie pary czynnika roboczego do temperatury nasycenia T_{34vc} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 5. Kolejno, nasycona para czynnika roboczego trafia rurociągiem 34v do piątego wymiennika ciepła W5. Ciecz magazynująca ciepło o temperaturze $T_{w5a} < T_{34vc}$ pobierana jest (przez piąty układ pompujący CP5) ze zbiornika stanu rozładowania piątego magazynu ciepła Z5a i pompowana jest przeciwprądowo przez drugą stronę piątego wymiennika ciepła W5. Z powodu różnicy temperatur T_{w5a} oraz T_{34vc} w piątym wymienniku ciepła W5 następuje przepływ strumienia ciepła z czynnika roboczego do cieczy pobranej ze zbiornika stanu rozładowania piątego magazynu ciepła Z5a. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym pompy ciepła 2 a cieczą ze zbiornika stanu rozładowania piątego magazynu ciepła Z5a za piątym wymiennikiem ciepła W5 temperatura cieczy z tego zbiornika Z5a ulega zwiększeniu do temperatury T_{w5b} . Ogrzana ciecz ze zbiornika stanu rozładowania piątego magazynu ciepła Z5a trafia, poprzez piąty układ pompujący CP5 do zbiornika stanu naładowania piątego magazynu ciepła Z5b. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje skroplenie pary czynnika roboczego, w zmiennej temperaturze, do temperatury nasycenia T_{34lc} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 4. Kolejno, nasycona ciecz czynnika roboczego trafia rurociągiem 34l do szóstego wymiennika ciepła W6. Ciecz magazynująca ciepło o temperaturze $T_{w6a} < T_{34lc}$ pobierana jest (przez szósty układ pompujący CP6) ze zbiornika stanu rozładowania szóstego magazynu ciepła Z6a i pompowana jest przeciwprądowo przez drugą stronę szóstego wymiennika ciepła W6. Z powodu różnicy temperatur T_{w6a} oraz T_{34lc} w szóstym wymienniku ciepła W6 następuje przepływ

strumienia ciepła z cieczy roboczej do cieczy pobranej ze zbiornika stanu rozładowania szóstego magazynu ciepła Z6a. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym pompy ciepła 2 a cieczą ze zbiornika stanu rozładowania szóstego magazynu ciepła Z6a za szóstym wymiennikiem ciepła W6 temperatura cieczy z tego zbiornika Z6a ulega zwiększeniu do temperatury T_{w6b} . Ogrzana ciecz ze zbiornika stanu rozładowania szóstego magazynu ciepła Z6a trafia, poprzez szósty układ pompujący CP6 do zbiornika stanu naładowania szóstego magazynu ciepła Z6b. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje przechłodzenie cieczy czynnika roboczego do temperatury nasycenia T_{4c} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 4. Następnie, przechłodzona ciecz czynnika roboczego trafia rurociągiem 4c na wlot ekspandera cieczowego LT, w którym następuje ekspansja cieczy czynnika roboczego od ciśnienia p_{4c} do ciśnienia $p_{0c} \approx p_{1c}$, na skutek czego ekspander cieczowy LT napędza generator elektryczny GLT odzyskując tym samym część energii dostarczonej do sprężarki C. Po ekspansji w ekspanderze cieczowym LT, ciecz czynnika roboczego trafia do zbiornika ZC czynnika roboczego, co zamyka cykl sprężarkowej pompy ciepła 2. Obieg sprężarkowej pompy ciepła 2 pracuje tak długo, jak dostarczana jest energia elektryczna do silnika elektrycznego MC, albo dopóki całe objętości cieczy ze zbiorników stanu rozładowania magazynów chłodu Z1a, Z2a, Z3a i ciepła Z4a, Z5a i Z6a nie zostaną przepompowane do zbiorników stanu naładowania magazynów chłodu Z1b, Z2b, Z3b i ciepła Z4b, Z5b i Z6b. Po zakończeniu pracy sprężarkowej pompy ciepła 2 magazyny chłodu Z1, Z2 i Z3 oraz magazyny ciepła Z4, Z5 i Z6 są napełnione częściowo lub w całości.

Rozładowywanie układu do magazynowania energii elektrycznej

Podczas rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej 1 magazyny ciepła Z4, Z5 i Z6 oraz magazyny chłodu Z1, Z2 i Z3 wykorzystywane są, jako źródło ciepła zasilające obieg Rankine'a. Magazyny ciepła Z4, Z5 i Z6 wykorzystywane są jako górne źródło ciepła obiegu Rankine'a, natomiast magazyny chłodu Z1, Z2 i Z3 wykorzystywane są jako dolne źródło ciepła obiegu Rankine'a. Obieg Rankine'a generuje energię, która jest przekazywana poprzez generator elektryczny T do odbiornika 5.

Proces rozładowywania układu do magazynu energii elektrycznej 1 przebiega w taki sposób, że czynnik roboczy obiegu Rankine'a 3 (ten sam czynnik roboczy, co

w przypadku obiegu sprężarkowej pompy ciepła 2) w postaci przechłodzonej cieczy o temperaturze $T_{1t} \approx T_{0t}$ zasysany jest ze zbiornika ZC czynnika roboczego przez pompę czynnika roboczego FP i trafia na nią rurociągiem $0t$. Na skutek wykonywania pracy na czynniku roboczym przez pompę FB ciecz czynnika roboczego zwiększa swoje ciśnienie z ciśnienia $p_{1t} \approx p_{0t}$ do ciśnienia p_{4t} . Ciecz czynnika roboczego o temperaturze $T_{4t} \approx T_{0t}$ kierowana jest rurociągiem $4t$ do szóstego wymiennika ciepła W6. Ciecz magazynująca ciepło o temperaturze $T_{w6b} > T_{4t}$ pobierana jest, przez szósty układ pompujący CP6, ze zbiornika stanu naładowania szóstego magazynu ciepła Z6b i pompowana przeciwnie przez drugą stronę szóstego wymiennika ciepła W6. Z powodu różnicy temperatur T_{w6b} oraz T_{4t} w szóstym wymienniku ciepła W6 następuje przepływ strumienia ciepła z cieczy pobieranej ze zbiornika stanu naładowania szóstego magazynu ciepła Z6b do czynnika roboczego obiegu Rankine'a 3. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym obiegu Rankine'a 3 a cieczą ze zbiornika stanu naładowania szóstego magazynu ciepła Z6b za szóstym wymiennikiem ciepła W6 temperatura cieczy z tego zbiornika Z6b ulega zmniejszeniu do temperatury T_{w6a} . Schłodzona ciecz ze zbiornika stanu naładowania szóstego magazynu ciepła Z6b trafia, poprzez szósty układ pompujący CP6 do zbiornika stanu rozładowania szóstego magazynu ciepła Z6a. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje ogrzanie czynnika roboczego do temperatury T_{34lt} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 6. Następnie, ogrzany czynnik roboczy o temperaturze T_{34lt} przepływa rurociągiem $34l$ do piątego wymiennika ciepła W5. Ciecz magazynująca ciepło o temperaturze $T_{w5b} > T_{34lt}$ pobierana jest (przez piąty układ pompujący CP5) ze zbiornika stanu naładowania piątego magazynu ciepła Z5b i pompowana jest przeciwnie przez drugą stronę piątego wymiennika ciepła W5. Z powodu różnicy temperatur T_{w5b} oraz T_{34lt} w piątym wymienniku ciepła W5 następuje przepływ strumienia ciepła z cieczy pobranej z tego zbiornika Z5b do czynnika roboczego obiegu Rankine'a 3. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym obiegu Rankine'a 3 a cieczą ze zbiornika stanu naładowania piątego magazynu ciepła Z5b za piątym wymiennikiem ciepła W5 temperatura cieczy z tego zbiornika Z5b ulega zmniejszeniu do temperatury T_{w5a} . Schłodzona ciecz ze zbiornika stanu naładowania piątego magazynu ciepła Z5b trafia, poprzez piąty układ pompujący CP5 do zbiornika stanu rozładowania piątego magazynu ciepła Z5a. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje zmiana

temperatury czynnika roboczego do temperatury T_{34vt} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 6. Kolejno, ogrzany czynnik roboczy o temperaturze T_{34vt} przepływa rurociągiem 34v do czwartego wymiennika ciepła W4. Ciecz magazynująca ciepło o temperaturze $T_{w4b} > T_{34vt}$ pobierana jest (przez czwarty układ pompujący CP4) ze zbiornika stanu naładowania czwartego magazynu ciepła Z4b i pompowana jest przeciwwądowo przez drugą stronę czwartego wymiennika ciepła W4. Z powodu różnicy temperatur T_{w4b} oraz T_{34vt} w czwartym wymienniku ciepła W4 następuje przepływ strumienia ciepła z cieczy pobranej z tego zbiornika Z4b do czynnika roboczego obiegu Rankine'a 3. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym obiegu Rankine'a 3 a cieczą ze zbiornika stanu naładowania czwartego magazynu ciepła Z4b za czwartym wymiennikiem ciepła W4 temperatura cieczy z tego zbiornika Z4b ulega zmniejszeniu do temperatury T_{w4a} . Schłodzona ciecz ze zbiornika stanu naładowania czwartego magazynu ciepła Z4b trafia, poprzez czwarty układ pompujący CP4 do zbiornika stanu rozładowania czwartego magazynu ciepła Z4a. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje zmiana temperatury czynnika roboczego do temperatury T_{3t} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 5. Strumień czynnika roboczego w postaci pary przegrzanej trafia rurociągiem 3t na wlot ekspandera cieplnego T. Ekspander cieplny T odbiera energię z czynnika roboczego i w postaci pracy przekazuje ją do generatora elektrycznego GT, z którego pobierana jest energia elektryczna. Na skutek odbioru energii z czynnika roboczego spada jego temperatura do T_{2t} oraz ciśnienie do p_{3t} . Następnie, para czynnika roboczego trafia z wylotu ekspandera cieplnego T do trzeciego wymiennika ciepła W3. Ciecz magazynująca chłód o temperaturze $T_{w3b} < T_{2t}$ pobierana jest (przez trzeci układ pompujący CP3) ze zbiornika stanu naładowania trzeciego magazynu chłodu Z3b i pompowana jest przeciwwądowo przez drugą stronę trzeciego wymiennika ciepła W3. Z powodu różnicy temperatur T_{w3b} oraz T_{2t} w trzecim wymienniku ciepła W3 następuje przepływ strumienia ciepła z czynnika roboczego do cieczy pobranej ze zbiornika stanu naładowania trzeciego magazynu chłodu Z3b. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym obiegu Rankine'a 3 a cieczą ze zbiornika stanu naładowania trzeciego magazynu ciepła Z3b za trzecim wymiennikiem ciepła W3 temperatura cieczy z tego zbiornika Z3b ulega zwiększeniu do temperatury T_{w3a} . Ogrzana ciecz ze zbiornika stanu naładowania trzeciego magazynu chłodu Z3b trafia, poprzez trzeci układ pompujący CP3 do zbiornika stanu naładowania

trzeciego magazynu chłodu Z3a. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje schłodzenie czynnika roboczego do temperatury T_{12vt} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 5. Kolejno, schłodzony czynnik roboczy o temperaturze T_{12vt} przepływa rurociągiem 12v do drugiego wymiennika ciepła W2. Ciecz magazynująca chłód o temperaturze $T_{w2b} < T_{12vt}$ pobierana jest (przez drugi układ pompujący CP2) ze zbiornika stanu naładowania drugiego magazynu chłodu Z2b i pompowana jest przeciwwąadowo przez drugą stronę drugiego wymiennika ciepła W2. Z powodu różnicy temperatur T_{w2b} oraz T_{12vt} w drugim wymienniku ciepła W2 następuje przepływ strumienia ciepła z czynnika roboczego obiegu Rankine'a 3 do cieczy pobranej ze zbiornika stanu naładowania drugiego magazynu chłodu Z2b. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym obiegu Rankine'a 3 a cieczą ze zbiornika stanu rozładowania drugiego magazynu chłodu Z2b za drugim wymiennikiem ciepła W2 temperatura cieczy z tego zbiornika Z2b ulega zwiększeniu do temperatury T_{w2a} . Ogrzana ciecz ze zbiornika stanu naładowania drugiego magazynu chłodu Z2b trafia, poprzez drugi układ pompujący CP2 do zbiornika stanu rozładowania drugiego magazynu chłodu Z2a. Ponadto, na skutek wymiany strumienia ciepła, następuje spadek temperatury czynnika roboczego do temperatury T_{12lt} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 5. Następnie, schłodzony czynnik roboczy o temperaturze T_{12lt} przepływa rurociągiem 12l do pierwszego wymiennika ciepła W1. Ciecz magazynująca chłód o temperaturze $T_{w1b} < T_{12lt}$ pobierana jest (przez pierwszy układ pompujący CP1) ze zbiornika stanu naładowania pierwszego magazynu chłodu Z1b i pompowana jest przeciwwąadowo przez drugą stronę pierwszego wymiennika ciepła W1. Z powodu różnicy temperatur T_{w1b} oraz T_{12lt} w pierwszym wymienniku ciepła W1 następuje przepływ strumienia ciepła z czynnika roboczego obiegu Rankine'a 3 do cieczy pobranej ze zbiornika stanu naładowania pierwszego magazynu chłodu Z1b. Na skutek wymiany strumienia ciepła pomiędzy czynnikiem roboczym obiegu Rankine'a 3 a cieczą ze zbiornika stanu naładowania pierwszego magazynu chłodu Z1b za pierwszym wymiennikiem ciepła W1 temperatura cieczy z tego zbiornika Z1b ulega zwiększeniu do temperatury T_{w1a} . Ogrzana ciecz ze zbiornika stanu naładowania pierwszego magazynu chłodu Z1b trafia, poprzez pierwszy układ pompujący CP1 do zbiornika stanu rozładowania pierwszego magazynu chłodu Z1a. Ponadto, na skutek wymiany strumienia

ciepła, następuje spadek temperatury czynnika roboczego do temperatury T_{1t} . Bilans tego procesu pokazano na Fig. 5.

W trakcie rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej 1 temperatura wody T_{w3a}' na wylocie z trzeciego wymiennika ciepła $W3$ różni się od odpowiadającej jej temperatury podczas ładowania układu do magazynowania energii elektrycznej 1, czyli T_{w3a} w taki sposób, że temperatura $T_{w3a}' < T_{w3a}$. Aby temperatura wody powracającej do zbiornika stanu rozładowania trzeciego magazynu chłodu $Z3a$ była równa pierwotnej temperaturze T_{w3a} konieczne jest wykorzystanie układu bilansującego (regulującego) temperaturę T_{B3} .

W trakcie rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej 1 temperatura wody T_{w6a}' na wylocie z szóstego wymiennika ciepła $W6$ różni się od odpowiadającej jej temperatury podczas ładowania układu do magazynowania energii elektrycznej 1, czyli T_{w6a} w taki sposób, że $T_{w6a}' > T_{w6a}$. Aby temperatura wody powracającej do zbiornika stanu rozładowania szóstego magazynu ciepła $Z6a$ była równa pierwotnej temperaturze T_{w6a} konieczne jest wykorzystanie układu bilansującego (regulującego) temperaturę T_{B6} .

Obieg Rankine'a 3 pracuje tak długo, jak długo jest zapotrzebowanie na energię elektryczną z generatora elektrycznego GT, albo dopóki całe objętości cieczy ze zbiorników stanu naładowania magazynów chłodu $Z1b, Z2b, Z3b$ i ciepła $Z4b, Z5b$ i $Z6b$ nie zostaną przepompowane do zbiorników stanu rozładowania magazynów chłodu $Z1a, Z2a, Z3a$ i ciepła $Z4a, Z5a, Z6a$. Po zakończeniu pracy obiegu Rankine'a 3 magazyny chłodu $Z1, Z2$ i $Z3$ oraz magazyny ciepła $Z4, Z5$ i $Z6$ są częściowo lub w całości opróżnione. Cykl rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej 1 przedstawiono graficznie na wykresie temperatura-entropia Fig. 6.

Przykład II

Układ do magazynowania energii elektrycznej analogiczny jak w Przykładzie I, przy czym sprężarka C oraz ekspander cieplny T są tym samym urządzeniem z tą różnicą, że podczas ładowania i rozładowywania układu do magazynowania energii 1 przepływ czynnika roboczego odbywa się w przeciwne strony. Analogicznie, ekspander ciekłowy LT i pompa czynnika roboczego FP mogą być tym samym urządzeniem z tą różnicą, że podczas rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej 1 przepływ czynnika roboczego odbywa się w przeciwne strony. Silnik MC zasilający sprężarkę C

oraz silnik MP zasilający pompę PF czynnika roboczego, a także generatory elektryczne GT i GLP są jednym i tym samym urządzeniem, w dodatku osadzonym na wspólnym wale ze sprężarką C, ekspanderem cieczowym LT, pompą FP czynnika roboczego oraz ekspanderem cieplnym T, tak, jak to przedstawiono na Fig. 7. Podczas ładowania i rozładowywania układu do magazynowania energii elektrycznej 1 zmienia się kierunek obrotów urządzeń i charakter pracy urządzeń. Urządzenie C / T z Fig. 7 pracuje, w zależności od trybu pracy albo jako sprężarka C, albo jako ekspander cieplny T. Urządzenie LT / FP z Fig. 7 pracuje, w zależności od trybu pracy albo jako ekspander cieczowy LT, albo jako pompa czynnika roboczego FP. Urządzenie MC / GLT / MP / GT z Fig. 7 pracuje, w zależności od trybu pracy albo jako silnik elektryczny MC i jednocześnie generator GLT albo jako silnik elektryczny MP i jednocześnie jako generator GT.