

Energooszczędne rozwiązania klimatyzacyjne

Modernizacja układu wody chłodzącej agregat absorpcyjny

Marcin Malicki

W artykule przyjrzymy się możliwościom poprawy efektywności energetycznej układu wody chłodzącej agregatu absorpcyjnego, który pracuje na potrzeby instalacji klimatyzacyjnej budynku biurowego. Sprawdzimy również, jak duże korzyści można uzyskać w zakresie zużycia energii elektrycznej przy zmianie systemu sterowania pompami wody chłodzącej.

Istotnym elementem działań prowadzących do poprawy efektywności energetycznej jest optymalizacja wykorzystania ciepła w sposób umożliwiający zamianę go na energię użyteczną: ciepło o wyższej temperaturze, energię elektryczną czy chłód. Mając na uwadze rozpowszechniające się zapotrzebowanie na komfort cieplny, nie tylko zimą, ale także latem, prowadzące do istotnego zwiększenia zapotrzebowania na energię do celów produkcji chłodu, istotne miejsce w działaniach prowadzących do poprawy efektywności energetycznej zajmują technologie klimatyzacyjne wykorzystujące ciepło odpadowe bądź nieużyteczne, a wśród nich technologie sorpcyjne.

Chłodziarki sorpcyjne – istota sprawności

Jak wspomniałem, znaczenie technologii sorpcyjnych wzrasta w kontekście istotnego wzrostu zapotrzebowania na energię zasilającą urządzenia klimatyzacyjne, co jest szczególnie widoczne w dużych metropoliach, takich jak np. Londyn, gdzie do 2030 r. prognozowany jest przyrost zainstalowanej mocy chłodniczej o 40%, głównie z wykorzystaniem urządzeń zasilanych energią elektryczną.

Na świecie systemy chłodzenia są odpowiedzialne za zużycie od 16% do nawet 50% energii elektrycznej, przy ponad 40% udziale zużycia energii przez sektor mieszkaniowo-usługowy. Prowadzi to bezpośrednio do występowania szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną do celów klimatyzacyjnych w okresie letnim, kiedy to moc krajowego systemu elektroenergetycznego jest najmniejsza. Sytuacja taka może powodować lokalne deficyty

mocy, które pojawiały się już niejednokrotnie w dużych miastach. Wzmoczone działania mające na celu poprawę efektywności energetycznej oraz ograniczanie emisji do atmosfery doprowadziły technologie chłodziarek sorpcyjnych do powrotu na ścieżkę dynamicznego rozwoju zatrzymaną dekady temu przez bardzo niskie ceny energii elektrycznej. Chłodziarki sorpcyjne, w odróżnieniu od urządzeń sprężarkowych, mogą być zasilane energią o niższej jakości, która może być pozyskiwana także ze źródeł odnawialnych, np. promieniowania słonecznego, geotermii czy ciepła odpadowego bądź nieużytecznego.

Sprawność urządzeń sorpcyjnych, rozumiana jako stosunek użytecznego efektu chłodzenia do energii zasilającej urządzenie, jest niższa niż w urządzeniach sprężarkowych, jednak możliwości zasilania ich ciepłem nieużytecznym bądź odpadowym w miejscu jego powstawania sprawia, że niejednokrotnie zużycie energii pierwotnej na wyprodukowaną jednostkę chłodu jest niższe od rozwiązań konwencjonalnych.

! To właśnie sprawność produkcji chłodu w urządzeniach sorpcyjnych sprawia, że rozważania na temat efektywności energetycznej układu wody chłodzącej stają się bardzo istotnym tematem.

Stosowane czynniki chłodnicze. W sorpcyjnych agregatach chłodniczych energia jest doprowadzana w jednej z następujących postaci:

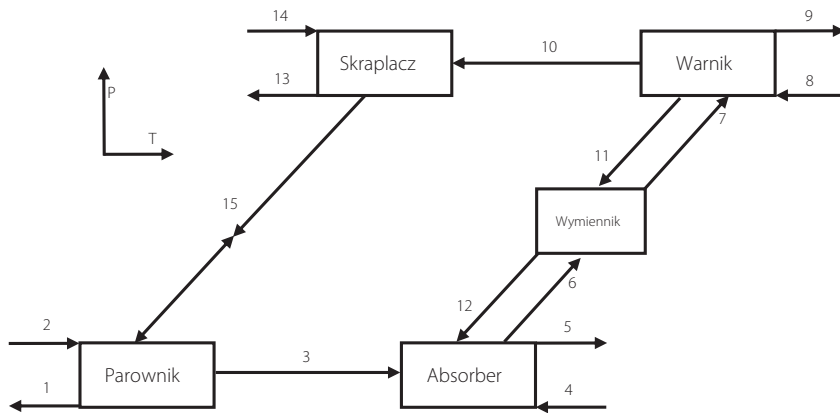
- ciepła, pochodzącego ze spalania paliwa, np. gazu, biogazu, oleju;
- ciepłej wody, np. z sieci ciepłowniczej, jako ciepło nieużyteczne z urządzenia kogene-

racyjnego bądź procesu technologicznego, z kolektorów słonecznych;

- pary, np. para nieużyteczna z procesów technologicznych albo produkowana specjalnie na potrzeby zasilania urządzenia;
- energii elektrycznej (np. przy wykorzystaniu grzałki).

Chłodzonym czynnikiem najczęściej jest woda bądź jej niezamarzająca mieszanina, powietrze lub inny czynnik pośredniczący w wymianie ciepła. Wielu autorów przeanalizowało zastosowanie szeregu czynników wykorzystywanych w agregatach sorpcyjnych. Analizowane były pary adsorbentów bądź absorbentów i czynników chłodniczych, takie jak: $H_2O/LiBr$; $H_2O/LiBr + HO(CH_2)_3OH$; NH_3/H_2O i $NH_3/LiNO_3$ czy $NH_3/NaSCN$.

Dostępne na rynku produkty komercyjne wiodących światowych producentów urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych wykorzystują, w zależności od wymaganego parametru czynnika chłodniczego, mieszaniny woda/bromek litu ($H_2O/LiBr$) bądź amoniak/woda (NH_3/H_2O). Wybór konkretnego rozwiązania zależy głównie od wymaganej temperatury czynnika chłodniczego oraz jakości dostępnego ciepła. Wszędzie tam, gdzie potrzebny jest czynnik chłodniczy o temperaturze nie niższej niż $4^\circ C$ (głównie klimatyzacja oraz chłodzenie procesów technologicznych i przemysłowych) wykorzystywany jest wodny roztwór bromku litu. W niższym zakresie temperatury (nawet do $-50^\circ C$) używany jest roztwór amoniak/woda. W związku z powszechnością stosowania w rozwiązaniach klimatyzacyjnych bromolitowych chłodziarek absorpcyjnych, niniejsza analiza możliwości poprawy efektywności energetycznej będzie dotyczyła właśnie takich układów.



1. Schemat cyklu chłodzenia jednoefektowego agregatu absorpcyjnego opartego na wodnym roztworze bromku litu przedstawiony na wykresie ciśnienie/temperatura (przebieg cyklu opisany w tekście)

Układ z bromolitową chłodziarką absorpcyjną

Na rysunku 1 zaprezentowano schemat ideowy cyklu chłodzenia agregatu absorpcyjnego opartego na roztworze bromku litu (LiBr), jako czynnika roboczym, i wodzie (H₂O), jako czynnika chłodniczym. Cykl chłodzenia przebiega w następujący sposób:

- do wężownicy dostarczana jest energia w postaci ciepła (8), podgrzewając wodny roztwór LiBr/H₂O, dzięki czemu woda z roztworu ulega odparowaniu i trafia do skraplacza (10), a stężony roztwór LiBr, przez wymiennik ciepła (11), trafia do absorbera (12), wstępnie podgrzewając rozcieńczony roztwór powracający z absorbera;
- ciepło zasilające opuszcza system przy temperaturze niższej niż zasilająca (9);
- stężony i wstępnie ochłodzony absorbent pochłania niskoprężny czynnik chłodniczy z parownika w będącym w równowadze ciśnieniowej z parownikiem absorberze (3) i ulega rozcieńczeniu;
- rozcieńczony czynnik roboczy jest następnie pompowany przez wymiennik ciepła (6), w którym ulega wstępnemu podgrzaniu, do wężownicy (7);
- w wężownicy ponawiany jest proces odparowania H₂O z rozcieńczonego roztworu, dzięki czemu para wodna pod wysokim ciśnieniem trafia do skraplacza (10), w którym, oddając ciepło skraplania (13), ulega kondensacji;
- gorący, skroplony czynnik chłodniczy (15) jest następnie rozprężany w parowniku, gdzie, wrząc przy niskim ciśnieniu i temperaturze, odbiera ciepło z chłodzonego obszaru (2), obniżając jego temperaturę (1);
- zimny czynnik chłodniczy pod niskim ciśnieniem trafia następnie do absorbera (3), gdzie

jest pochłaniany, rozcieńczając stężony czynnik roboczy.

Dodam, że dla strumieni 4-5 (odebranie ciepła absorpcji) i 13-14 (odebranie ciepła skraplania) najczęściej wykorzystywane są wieże chłodnicze, a strumień 1-2 to użyteczny produkt pracy układu absorpcyjnego – woda lodowa na cele procesowe bądź klimatyzacyjne.

Sprawność produkcji chłodu, definiowana jako współczynnik COP (*Coefficient of Performance*), będący stosunkiem uzyskanej mocy chłodniczej do użytecznej energii zasilającej, dla chłodziarek absorpcyjnych zasilanych gorącą wodą, kształtuje się na poziomie 0,6-0,8 (przy ideowym wskaźniku na poziomie 1 – różnica spowodowana jest stratami energii w urządzeniu). COP = 0,7 oznacza, że z jednej jednostki ciepła użytecznego wprowadzonego do układu wyprodukowane zostanie 0,7 jednostki chłodu użytecznego. Aby urządzenie pozostało w równowadze termodynamicznej, ilość energii wprowadzonej do układu (strumienie 1-2 oraz 8-9 zaznaczone na rys. 1) musi być równa ilości energii odprowadzonej z układu (strumienie 4-5 oraz 13-14). W tym wypadku ilość ciepła wprowadzonego w postaci wody gorącej

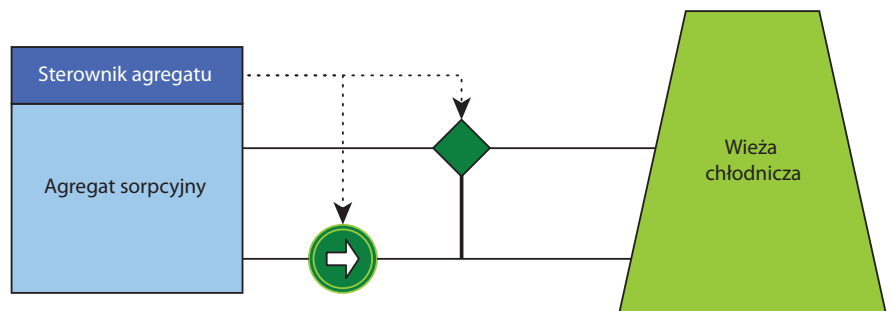
(1 jednostka) oraz wody lodowej (0,7 jednostki), a więc 1,7 jednostki energii, musi zostać odprowadzone do atmosfery za pomocą systemów zewnętrznych, takich jak chłodziarki wentylatorowe bądź wieże chłodnicze, połączone z chłodziarką absorpcyjną instalacją hydrauliczną.

Konwencjonalny układ wody chłodzącej z zaworem trójdrogowym. Konwencjonalny układ wody chłodzącej agregat absorpcyjny składa się z agregatu absorpcyjnego, wieży chłodniczej, zestawu pompowego oraz zaworu trójdrogowego. Agregat absorpcyjny, za pomocą wbudowanego układu elektronicznego, steruje działaniem zaworu trójdrogowego oraz układu pompowego.

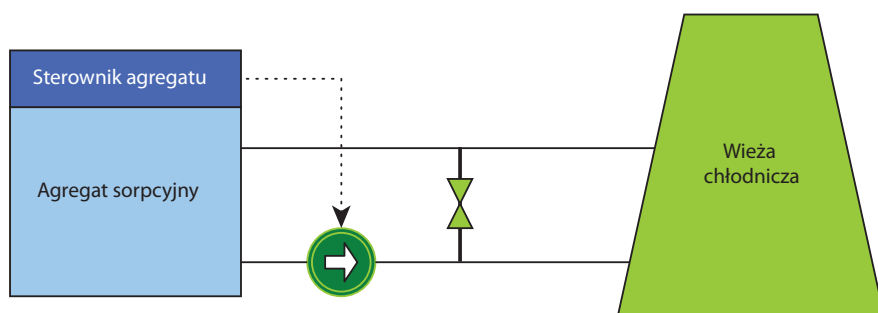
Sterowanie układem pompowym, zapewniającym stały przepływ wody chłodzącej przez urządzenie, odbywa się poprzez wysłanie sygnału „włącz” bądź „wyłącz”. Wszystkie pozostałe funkcje zestawu pompowego (np. wyrównanie czasu pracy pomp, utrzymywanie charakterystyki czy inne) realizowane są przez układ sterowania samego zestawu. Sterowanie zaworem trójdrogowym odbywa się natomiast przy wykorzystaniu sygnału napięciowego (np. 0-10 V) bądź natężeniowego (np. 4-20 mA), co umożliwi płynną regulację strumienia wody chłodzącej kierowanego na wieżę chłodniczą, gdzie wentylator wraz z lokalnym układem sterowania utrzymuje temperaturę wylotowej wody chłodzącej na zadanym poziomie.

Agregat absorpcyjny, sterując zaworem trójdrogowym, utrzymuje temperaturę absorpcji oraz skraplania czynnika chłodniczego w zadanym zakresie wartości – ze względu na ryzyko krystalizacji temperatura nie może być jednak zbyt niska, a ze względu na spadek wydajności nie może być też zbyt wysoka.

Zastosowanie tego rodzaju układu (na rys. 2 przykładowy schemat ideowy) jest w pełni bezpieczne dla urządzenia, umożliwia jego pracę,



2. Schemat ideowy układu wody chłodzącej wyposażonego w zawór trójdrogowy



3. Schemat ideowy układu wody chłodzącej agregat sorpcyjny wyposażonego w układ pompowy sterowany falownikiem

uruchomienie przy niskiej oraz wysokiej temperaturze zewnętrznej oraz bezpieczne odstawienie w każdych warunkach.

Energooszczędny układ wody chłodzącej z układem pompowym sterowanym falownikiem. Energooszczędny układ wody chłodzącej agregat sorpcyjny składa się z agregatu sorpcyjnego, wieży chłodniczej oraz zestawu pompowego z silnikiem sterowanym falownikiem. W tym rozwiązaniu agregat sorpcyjny, za pomocą wbudowanego układu elektronicznego, steruje działaniem układu pompowe-

Zastosowanie tego rodzaju układu (na rys. 3. przykładowy schemat ideowy), podobnie jak w poprzednim przypadku, jest w pełni bezpieczne dla urządzenia, umożliwia jego pracę oraz bezpieczne odstawienie w każdych warunkach. Przy rozruchu, w wypadku występowania niskiej temperatury zewnętrznej, a co za tym idzie – niskiej temperatury wody chłodzącej, niezbędne jest wykorzystanie by-passu umożliwiającego szybkie podgrzanie wody chłodzącej przez agregat sorpcyjny. By-pass jest otwierany w trakcie rozruchu, a po osiągnięciu oczekiwanej temperatury wody w obiegu – zamykany.

potrzebną do pracy układu wody chłodzącej w wariantcie konwencjonalnym (stały przepływ) oraz w wariantcie energooszczędnym (zmienny przepływ). W modelu uwzględniono również zmiany przepływu wody chłodzącej zgodnie z wytycznymi producenta agregatu absorpcyjnego – w zakresie od 60% do 100% przepływu nominalnego dostosowanego do zapotrzebowania na moc chłodniczą. Zużycie energii elektrycznej przez zestawy pompowe zostało obliczone na podstawie kart katalogowych dla przepływów wody chłodzącej w zakresie od 60% do 100% przepływu nominalnego. Ponadto przeprowadzono dodatkowe porównanie w zależności od czasu eksploatacji instalacji, ponieważ stosowaną praktyką, mającą na celu uzyskanie oszczędności finansowych, jest wyłączanie układu klimatyzacyjnego poza godzinami pracy. W tym wypadku zapotrzebowanie na chłód do celów klimatyzacyjnych występowało w godzinach od 7 do 21, dlatego też przeanalizowano wariant, w którym źródło chłodu było włączane o godzinie 7 a wyłączane o 21.

Eksplatacja instalacji klimatyzacyjnej w sposób ciągły. Rysunek 4 przedstawia porównanie zużycia energii elektrycznej przez zestawy pompowe dla przykładowego letniego dnia, w wypadku eksploatacji instalacji klimatyzacyjnej w sposób ciągły. Jak widać, roczne oszczędności z wdrożenia systemu regulacji przepływu wody chłodzącej za pomocą agregatu absorpcyjnego kształtują się wówczas na poziomie 25,45 MWh energii elektrycznej – roczne zużycie energii elektrycznej przez układ bez regulacji przepływu dla modelowego okresu od maja do września wynosi 55,04 MWh, a układu zmiennoprzepływowego 29,59 MWh, co oznacza redukcję zużycia po modernizacji o 53,76%.

Eksplatacja instalacji klimatyzacyjnej od godz. 7 do 21. Porównanie zużycia energii elektrycznej przez zestawy pompowe dla przykładowego letniego dnia, w wypadku eksploatacji instalacji klimatyzacyjnej od godziny 7 do 21 jest pokazane na rysunku 5. Roczne oszczędności z wdrożenia systemu regulacji przepływu wody chłodzącej za pomocą agregatu absorpcyjnego kształtują się wówczas na poziomie 15,76 MWh energii elektrycznej – roczne zużycie energii elektrycznej przez układ bez regulacji przepływu dla modelowego okresu od maja do września wynosi 34,4 MWh, a układu zmiennoprzepływowego 18,64 MWh, co oznacza redukcję zużycia o 54,19%.

Wydaje się, że hybrydowa konstrukcja źródła chłodniczego dla budynku biurowego, zakładająca wykorzystanie agregatu absorpcyjnego jako źródła podstawowego i agregatu np. sprężarkowego jako źródła szczytowego, będzie umożliwiała osiągnięcie wysokich wskaźników poprawy efektywności energetycznej całego układu chłodniczego.

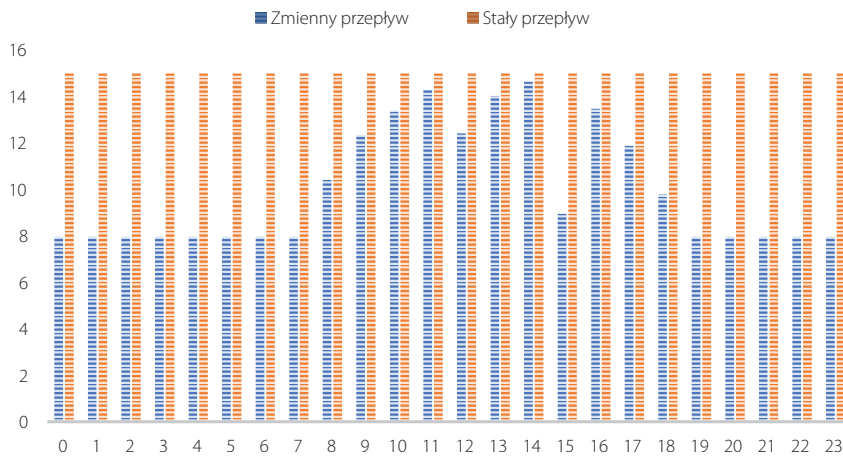
go nie tylko przez wysłanie sygnału „włącz” lub „wyłącz”, ale także przy wykorzystaniu sygnału napięciowego (np. 0-10 V) bądź natężeniowego (np. 4-20 mA), co umożliwi płynną regulację strumienia wody chłodzącej przepływającej przez agregat. Zakres zmienności strumienia wody chłodzącej zależy od producenta, jednak zwykle nie jest mniejszy niż 60-120% przepływu nominalnego. Ten sam strumień wody – po odebraniu ciepła skraplania i adsorpcji czynnika chłodniczego – kierowany jest na wieżę chłodniczą, gdzie wentylator, wraz z lokalnym układem sterowania, utrzymuje temperaturę wylotowej wody chłodzącej na zadanym poziomie. Agregat absorpcyjny, sterując przepływem wody chłodzącej przez skraplacz i absorber, utrzymuje temperaturę absorpcji oraz skraplania czynnika chłodniczego w zadanym zakresie wartości. Tak, jak w układzie konwencjonalnym, temperatura nie może być zbyt niska (ryzyko krystalizacji), ani zbyt wysoka (spadek wydajności).

Ocena korzyści z modernizacji

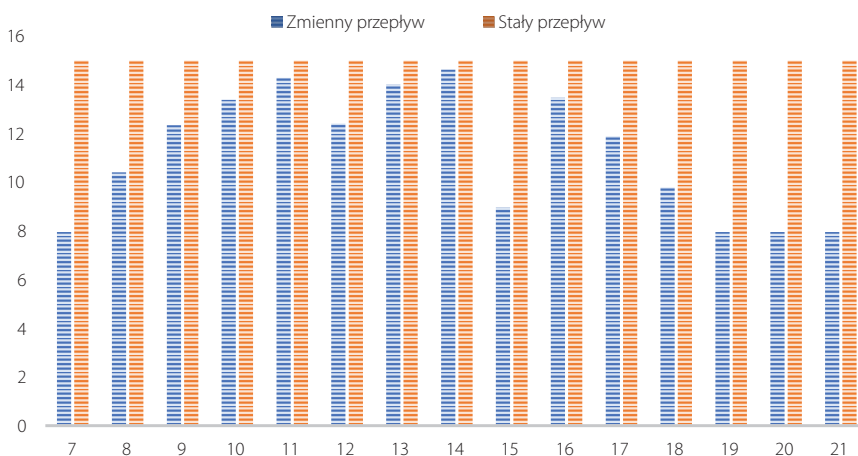
W celu oceny korzyści płynących z modernizacji systemu konwencjonalnego, przedstawionego na rysunku 2, na system energooszczędnego, przedstawionego na rysunku 3, opracowano model obliczeniowy zużycia energii elektrycznej przez układ wody chłodzącej. Do analizy wykorzystano komercyjnie dostępne urządzenia:

- agregat absorpcyjny SL Eco-Energy Systems HSA o mocy chłodniczej 500 kW;
- wieżę chłodniczą Evapco AT;
- zestaw pompowy Grundfos TPE.

Zapotrzebowanie na chłód do celów klimatyzacyjnych budynku biurowego zostało przyjęte na podstawie rzeczywistych danych historycznych z roku 2015 dla budynku biurowego klasy A, zlokalizowanego w województwie mazowieckim. Dla każdej z godzin pracy instalacji w okresie od maja do września 2015 r. obliczono zapotrzebowanie na energię elektryczną



4. Zużycie energii elektrycznej na potrzeby instalacji wody chłodzącej w wypadku ciągłej eksploatacji źródła chłodu



5. Zużycie energii elektrycznej na potrzeby instalacji wody chłodzącej w wypadku eksploatacji źródła chłodu od godziny 7 do 21

Ewentualne dodatkowe korzyści

Zaproponowana metoda poprawy efektywności energetycznej źródła za pomocą zmiany parametrów pracy chłodziarki absorpcyjnej doprowadziła do ograniczenia zużycia energii elektrycznej o ponad 50% rocznie. Niezależnie od wybranego wariantu eksploatacji źródła, czy to ciągłej, czy tylko w godzinach roboczych, oszczędności energii elektrycznej w bilansie były

bardzo znaczące – od ponad 18 MWh do prawie 30 MWh rocznie – tylko dla okresu letniego od maja do września.

Powyższe obliczenia modelowe nasuwają jednak także pytanie o kryteria doboru samego agregatu absorpcyjnego w bilansie całkowitego zapotrzebowania na chłód – w podanym okresie tylko raz pojawiło się szczytowe zapotrzebowanie na chłód, a więc szczytowe zapotrzebowanie na przepływ wody chłodzącej. Opisana wcześniej specyfika pracy agregatów

absorpcyjnych zasilanych wodą z $COP < 1$ (dla agregatów absorpcyjnych zasilanych parą, spaliniami bądź palnikiem COP jest znacząco wyższe od 1) prowadzi do dużego zapotrzebowania na wodę chłodzącą, która przez większość czasu eksploatacji nie jest w pełni wykorzystywana. Pozwala to domniemywać, że hybrydowa konstrukcja źródła chłodniczego dla budynku biurowego, zakładająca wykorzystanie agregatu absorpcyjnego jako źródła podstawowego i agregatu np. sprężarkowego jako źródła szczytowego, będzie umożliwiała osiągnięcie jeszcze wyższych wskaźników poprawy efektywności energetycznej całego układu chłodniczego.

Zarówno w kraju, jak i za granicą eksploatowane są układy, głównie trójgeneracyjne (skojarzonej produkcji energii elektrycznej, ciepła i chłodu), których dobery uwzględniają powyższą specyfikę. W takim wypadku konstrukcja źródła trójgeneracyjnego oraz agregatu sorpcyjnego, będącego jego częścią, dostosowana jest do pokrycia bazowego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz ciepło/chłód, a zapotrzebowanie szczytowe pokrywane jest przez instalacje zewnętrzne (sieć elektroenergetyczną, ciepło sieciowe, kotły wodne czy agregaty sprężarkowe).

Wdrożenie zaproponowanej metody poprawy efektywności energetycznej źródła chłodniczego, opartego na agregacie absorpcyjnym, jest stosunkowo proste – większość komercyjnie dostępnych sterowników agregatów absorpcyjnych może zostać rozbudowanych o dodatkową kartę wysyłającą sygnał napięciowy (0-10 V) albo natężeniowy (4-20 mA) w zależności od temperatury absorpcji/skrapiania bądź obciążenia chłodniczego. Doposażenie zestawów pompowych w układy falownikowe sterowane wyższymi sygnałami także nie wiąże się z dużymi kosztami. Należy jednak każdorazowo pamiętać o przeanalizowaniu możliwych parametrów pracy zainstalowanego agregatu absorpcyjnego, algorytmów uruchomienia oraz zatrzymania oraz wytycznych współpracy agregatu wraz z instalacją wody chłodzącej. ■

Tabela 1. Wielkość przepływu oraz redukcji zużycia energii dla obu wariantów eksploatacji systemu wody chłodzącej agregat absorpcyjny

Wariant/Czas eksploatacji	24 h	7 do 21
przepływ stały [MWh/a]	55,04	34,40
przepływ zmienny [MWh/a]	29,59	18,64
redukcja zużycia energii	53,76%	54,19%

O AUTORZE

dr inż. Marcin Malicki, absolwent Politechniki Warszawskiej, ekspert Komisji Europejskiej, dyrektor ds. technologii w New Energy Transfer, kierownik naukowy projektów badawczo-rozwojowych, autor szeregu publikacji i współtwórca wynalazków. Koncentruje się na zagadnieniach dot. poprawy efektywności energetycznej układów skojarzonych z wykorzystaniem technologii sorpcyjnych.

