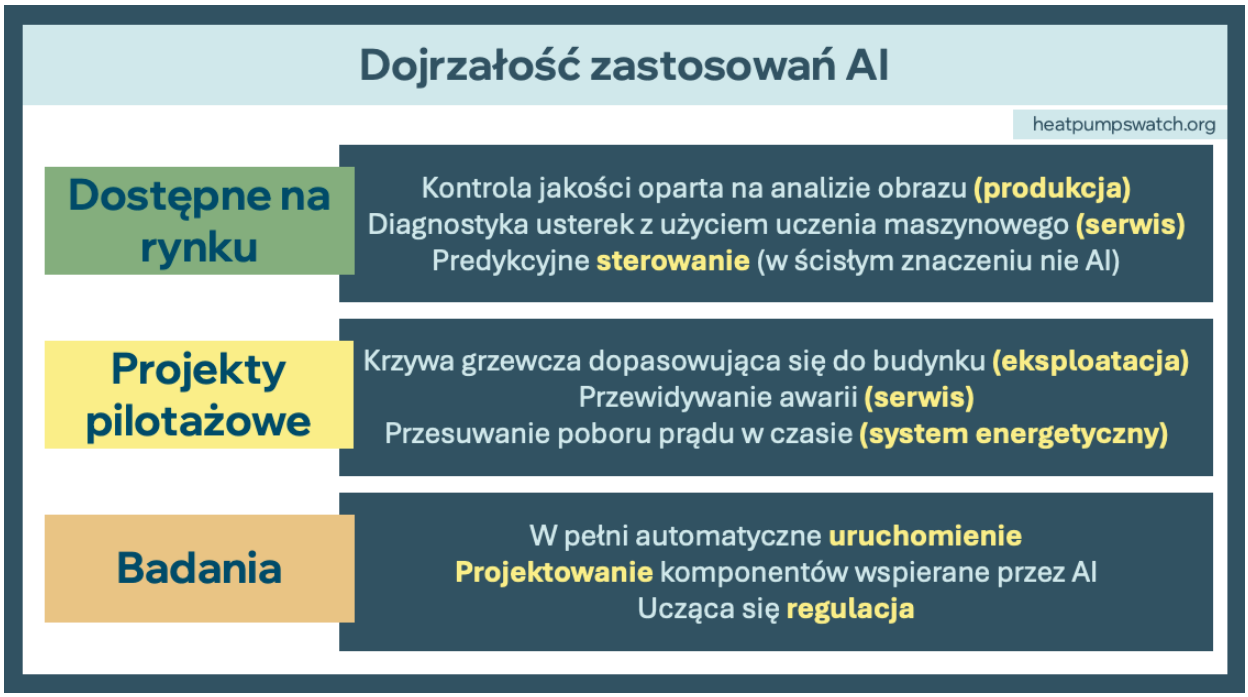
10/18

Pompy ciepła i sztuczna inteligencja: para idealna?
Stara potrzeba, nowe narzędzia

Autor: dr inż. Marek Miara. Oryginał opublikowany 19.01.2026 (niem.); wersja polska: 04.11.2026.

Potrzeba ciepła zimą i chłodu latem towarzyszy ludziom od tysięcy lat. Pompa ciepła zapewnia jedno i drugie, korzystając z dojrzałej, sprawdzonej technologii. Sztuczna inteligencja (ang. *artificial intelligence*, AI) jest natomiast dziedziną młodą i w wielu obszarach wciąż eksperymentalną. Czy te dwa światy mogą się sensownie połączyć?

Odpowiedź na to pytanie brzmi „tak", choć wymaga kilku zastrzeżeń. Pompa ciepła przechodzi długą drogę: od zaprojektowania i produkcji, przez dobór i montaż w budynku, aż po uruchomienie, wieloletnią pracę i serwis. Na każdym z tych etapów można coś usprawnić, także za pomocą różnych form sztucznej inteligencji. Często jednak pod hasłem „AI" kryją się zupełnie inne rozwiązania, a samo pojęcie służy jako modne hasło marketingowe. Ten artykuł pokazuje, gdzie rzeczywiście stosuje się AI i jak bardzo różni się stopień dojrzałości rynkowej poszczególnych zastosowań.



Co właściwie oznacza „inteligencja"

O prawdziwej sztucznej inteligencji można mówić wtedy, gdy system uczy się na podstawie doświadczenia, rozpoznaje wzorce, których nikt wprost nie zaprogramował, i potrafi dostosować się do nowych sytuacji. Większość takich systemów opiera się dziś na uczeniu maszynowym (ang. *machine learning*), czyli metodach, dzięki którym komputer sam uczy się na podstawie danych. Uczenie maszynowe nie jest więc synonimem AI, ale jej najważniejszą dziś odmianą.

Wiele systemów reklamowanych jako „inteligentne" działa jednak według sztywnych reguł. Wykonują one z góry zaprogramowane polecenia, na przykład podnoszą o stałą wartość temperaturę zasilania

(czyli temperaturę wody płynącej do grzejników lub ogrzewania podłogowego), gdy temperatura zewnętrzna spadnie poniżej określonego progu. Takie sterowanie to automatyka, a nie uczenie maszynowe.

Różnica między tymi podejściami jest zasadnicza. Systemy oparte na regułach działają według z góry określonej logiki. Systemy uczące się same wychwytują zależności w danych i zmieniają swoje działanie bez programowania każdego kroku.

Od projektu do serwisu

Kolejne części artykułu omawiają tę drogę krok po kroku, od producenta aż po wieloletnią pracę urządzenia w budynku. Przy każdym z etapów widać, jakie zastosowania AI już istnieją, które dopiero powstają w ośrodkach badawczych, a gdzie to pojęcie służy wyłącznie marketingowi.

1. Projektowanie i produkcja

Zanim pompa ciepła opuści fabrykę, przechodzi wiele kroków: od zaprojektowania komponentów, przez produkcję poszczególnych części, aż po złożenie urządzenia i kontrolę końcową. Na każdym z nich można coś poprawić, czy to dzięki lepszej konstrukcji, wydajniejszej produkcji, czy bardziej niezawodnej kontroli jakości.

Przy projektowaniu urządzenia chodzi o to, by wydobyć z komponentów jak najwięcej. Zwłaszcza w przypadku wymienników ciepła i sprężarek konstruktorzy szukają idealnego kształtu. Wymienniki powinny przekazywać jak najwięcej ciepła, a jednocześnie stawiać jak najmniejszy opór przepływającemu powietrzu lub wodzie. Sprężarki z kolei powinny sprężać czynnik chłodniczy z jak najmniejszymi stratami. Tylko wtedy pompa ciepła pracuje z najwyższą efektywnością i zużywa mało prądu. Aby zbliżyć się do tego ideału, inżynierowie muszą sprawdzić niezliczone kombinacje kształtów i kątów. Tradycyjnie opierają się przy tym na wieloletnim doświadczeniu i krok po kroku sprawdzają kolejne warianty w symulacjach komputerowych, aż uzyskają zadowalający wynik.

Pomocne mogą być tu metody uczenia maszynowego. Algorytmy analizują wyniki setek tysięcy symulacji i szukają w nich zależności, na które człowiek, kierując się intuicją, mógłby nie wpaść. Potrafią też zamienić wyniki tak wielu obliczeń w jeden prosty wzór, który potem pozwala błyskawicznie oszacować wynik dla nowego przypadku. Fachowo nazywa się to regresją symboliczną. Naukowcy z Politechniki Federalnej w Lozannie (EPFL) wykorzystali to podejście do szybkiego doboru wymiarów nowego rodzaju bardzo małych, wydajnych sprężarek do pomp ciepła. Uzyskane wzory dają wynik około 1500 razy szybciej niż szczegółowe obliczenia. Zastosowanie tych sprężarek zamiast dzisiejszych rozwiązań może natomiast obniżyć zapotrzebowanie pompy ciepła na energię elektryczną o 20–25 procent[1]. Opisane metody coraz częściej trafiają do prac badawczo-rozwojowych.

W produkcji AI wykorzystuje się przede wszystkim do kontroli jakości. Mikropęknięcia w połączeniach lutowanych, odchylenia w położeniu czujników czy nieregularności w wymiennikach ciepła trudno dostrzec gołym okiem, a mogą skrócić żywotność urządzenia. Systemy rozpoznawania obrazu, wytrenowane na tysiącach opisanych przykładów, wykrywają takie wady skuteczniej niż pracownicy kontroli jakości. W nowoczesnej produkcji przemysłowej to już standard.

2. Dobór urządzenia

Zanim pompa ciepła zostanie zamontowana, trzeba dobrać jej moc. Ile ciepła potrzebuje dany budynek? Od odpowiedzi na to pytanie zależy powodzenie całej instalacji.

Badania terenowe pokazują (zob. odcinek 2), że dobór zbyt dużej pompy ciepła (przewymiarowanie) jest częstym problemem. Gdy zainstalowana moc wyraźnie przekracza rzeczywiste potrzeby, urządzenie często pracuje tylko z niewielką częścią swojej mocy albo co chwilę się włącza i wyłącza (fachowo nazywa się to taktowaniem). Może to obniżać efektywność i przyspieszać zużycie.

Przyczyn takiego stanu rzeczy jest kilka. Obliczenia według norm zakładają warunki, które występują tylko przez kilka godzin w roku. Do tego trudno przewidzieć, jak mieszkańcy będą faktycznie korzystać z ogrzewania. W efekcie obliczone zapotrzebowanie na ciepło rozmija się z rzeczywistym. W Polsce dochodzi jeszcze jeden czynnik, ponieważ wartości temperatury zewnętrznej przyjmowane do obliczeń mają około pół wieku i nie odpowiadają już obecnemu klimatowi[2].

Pomóc mogłyby tu systemy uczące się na doświadczeniach z tysięcy działających instalacji. Mogłyby one trafniej wskazywać, jaka moc i konfiguracja pompy ciepła sprawdziły się najlepiej w podobnych budynkach. Modele oparte na danych z praktyki uzupełniałyby obliczenia według norm, a nie je zastępowały.

Co jest sprzedawane jako AI, choć nią nie jest

Większość „konfiguratorów AI" na stronach producentów to w rzeczywistości cyfrowe narzędzia doboru oparte na normach i bazach danych. Są przydatne i oszczędzają czas, ale niczego się nie uczą. Użytkownik wprowadza dane, system wyszukuje pasujące informacje i na tym proces się kończy. To cyfrowy katalog produktów z wygodną wyszukiwarką, a nie sztuczna inteligencja.

3. Montaż

Na etapie montażu wciąż zdarzają się błędy, które obniżają późniejszą efektywność i powodują niepotrzebne koszty.

Prawdziwe zastosowania AI na tym etapie są rzadkie. Większość „inteligentnych" narzędzi wspierających montaż ogranicza się do cyfrowych list kontrolnych albo instrukcji w rozszerzonej rzeczywistości (technice, w której cyfrowe wskazówki pojawiają się na ekranie tabletu lub w specjalnych okularach, bezpośrednio na tle montowanego urządzenia). To systemy oparte na regułach, które nie potrafią się uczyć.

Projekty badawcze sprawdzają rozwiązania samouczące się. W duńskim projekcie CEDAR powstaje system, który na podstawie danych pomiarowych tworzy wirtualny model instalacji, tak zwanego cyfrowego bliźniaka. Następnie sam, metodą prób i oceny skutków, szuka najlepszych ustawień pompy ciepła. Fachowo nazywa się to uczeniem przez wzmacnianie (ang. *reinforcement learning*). Celem jest rozwiązanie typu „zainstaluj i zapomnij", przy którym po montażu nie trzeba niczego ręcznie dostrajać, także w już działających instalacjach[3]. Zuryski Uniwersytet Nauk Stosowanych (ZHAW) prowadził z kolei projekt dotyczący automatyzacji uruchamiania pomp ciepła[4].

Obecnie o jakości instalacji wciąż decyduje przede wszystkim staranna praca dobrze przeszkolonych instalatorów.

4. Uruchomienie

Po montażu trzeba odpowiednio skonfigurować regulację pompy ciepła. Najważniejszym parametrem jest tak zwana krzywa grzewcza. Określa ona, jaka powinna być temperatura zasilania przy danej temperaturze zewnętrznej. W praktyce krzywą ustawia się zwykle raz, przy uruchomieniu, i później już się jej nie zmienia, choć powinno się ją sprawdzać i w razie potrzeby korygować.

Problem polega na tym, że krzywa grzewcza często już od początku nie jest ustawiona optymalnie, najczęściej zbyt wysoko i zbyt stromo. Oznacza to, że temperatura zasilania jest wyższa, niż wymaga tego budynek, a przy spadku temperatury na zewnątrz ta różnica jeszcze rośnie. Instalatorzy ustawiają bowiem krzywą zwykle z zapasem, aby mieszkańcom na pewno nie było zimno. W efekcie pompa ciepła przez większą część sezonu pracuje z zawyżoną temperaturą zasilania, co obniża jej efektywność.

Do tego budynki się zmieniają. Nowe okna wpływają na zapotrzebowanie na ciepło, kolejni mieszkańcy mają inne przyzwyczajenia, a materiały budowlane z czasem się starzeją. Raz ustawiona krzywa grzewcza nie dostosowuje się do tych zmian automatycznie.

W tym przypadku badania pokazują, że „prawdziwa" AI może realnie pomóc. Sieć neuronowa (rodzaj programu, który uczy się na podstawie danych) obserwuje budynek przez kilka dni. Rejestruje, jak szybko wychładzają się pomieszczenia, jak mocno nagrzewa je słońce i kiedy pracuje ogrzewanie. Na tej podstawie uczy się, jak budynek zachowuje się pod względem cieplnym, bez potrzeby wprowadzania do niej wzorów z fizyki budowli.

Dzięki temu system może sterować z wyprzedzeniem. Przewiduje popołudniowe zyski ciepła od słońca, rozpoznaje powtarzające się schematy korzystania z budynku i odpowiednio dostosowuje ogrzewanie.

W projekcie AI4HP niemiecki instytut Fraunhofer ISE wraz z partnerami z przemysłu i nauki stworzył i przetestował taki samouczący się regulator. W symulacjach pozwolił on zaoszczędzić od 5 do 13 procent energii w porównaniu ze standardową krzywą grzewczą, a jednocześnie poprawił komfort. Pierwszy, tygodniowy test w rzeczywistym budynku potwierdził działanie regulatora[5].

Wiele systemów określanych jako „samouczące się" opiera się jednak wyłącznie na przyzwyczajeniach użytkownika. System zapamiętuje, kiedy użytkownik ręcznie zmienia temperaturę, i powtarza ten harmonogram. To funkcja znana z programowalnych termostatów, a nie wykorzystanie sztucznej inteligencji.

5. Eksploatacja

W codziennej pracy pompy ciepła coraz częściej stosuje się sterowanie, które korzysta z matematycznego modelu budynku. Na jego podstawie system z wyprzedzeniem oblicza, jak zmiany w pracy ogrzewania wpłyną na temperaturę w pomieszczeniach. Fachowo takie podejście nazywa się sterowaniem predykcyjnym opartym na modelu (ang. *Model Predictive Control*, MPC).

MPC pozwala optymalizować pracę pompy ciepła, na przykład uwzględniać ceny energii elektrycznej i lepiej wykorzystywać prąd z własnej instalacji fotowoltaicznej. To jednak dopiero najprostsze zastosowanie. Znaczenie tej metody będzie rosło w miarę, jak pompa ciepła będzie coraz ściślej współpracować z innymi urządzeniami w domu, takimi jak magazyny energii czy samochody elektryczne. Trzeba będzie wtedy zgrać ze sobą pracę wielu urządzeń, ceny prądu i potrzeby mieszkańców, a do tego MPC nadaje się szczególnie dobrze.

W badaniu przeprowadzonym w niskoenergetycznym budynku biurowym w Niemczech takie sterowanie obniżyło w tygodniowym teście koszty energii o 40 procent. Pompa ciepła pracowała głównie wtedy, gdy prąd był tani, a ciepło gromadziła na zapas w zbiorniku. Według przyjętego w badaniu wskaźnika jej praca była przy tym o 13 procent korzystniejsza dla sieci elektroenergetycznej. Efektywność samej pompy ciepła (COP) spadła natomiast z 7,6 do 6,0, bo ciepło trzeba było magazynować w wyższej temperaturze[6]. Opłaca się to wyłącznie przy taryfie, w której cena prądu zmienia się w ciągu doby.

Nie jest to jednak sztuczna inteligencja w ścisłym znaczeniu, lecz optymalizacja matematyczna. System nie „uczy się" na podstawie doświadczenia. Oblicza najlepsze rozwiązanie na podstawie równań, które wcześniej ustalił inżynier. Metoda ta jest stosowana w przemyśle od lat 80. XX wieku i od dawna się sprawdza.

Nie umniejsza to jej przydatności. Kto chce zrozumieć, gdzie prawdziwa AI ma realne znaczenie, powinien znać tę granicę. Optymalizacja wyznacza najlepsze rozwiązanie w ramach znanych reguł. AI z definicji ma odkrywać reguły, których wcześniej nikt nie znał.

W przyszłości granica ta będzie się jednak zacierać. Przygotowanie dokładnego modelu każdego budynku jest pracochłonne, dlatego badacze pracują nad tym, aby zastąpić go modelem, którego system uczy się sam na podstawie danych pomiarowych[7]. Na tej zasadzie działa opisany wcześniej regulator z projektu AI4HP. Połączenie sterowania predykcyjnego z uczeniem maszynowym jest już wykorzystaniem AI, a jego znaczenie będzie rosło wraz z liczbą urządzeń, które trzeba ze sobą zgrać.

Gdzie prawdziwa AI sprawdza się w eksploatacji

Inną drogą idzie tak zwane uczenie przez wzmacnianie. System sam wypróbowuje różne strategie i ocenia ich skutki. Czy temperatura była komfortowa? Czy zużycie prądu było niskie? Z czasem uczy się, jakie działania w jakich sytuacjach dają najlepsze wyniki, choć nikt nie podał mu tych reguł.

Konkretnym przykładem jest sterowanie odszranianiem. W pompach ciepła powietrze-woda przy temperaturze zewnętrznej w okolicach zera i dużej wilgotności powietrza na parowniku (wymienniku, który pobiera ciepło z powietrza) osadza się szron i lód, które trzeba regularnie usuwać. Tradycyjne systemy robią to najczęściej w stałych odstępach czasu albo przy określonej temperaturze. System uczący się rozpoznaje wzorce w danych i sam znajduje najlepszy moment, ani za wcześnie (marnowanie energii), ani za późno (spadek efektywności i mocy grzewczej).

6. Serwis

Gdy pompa ciepła nie pracuje optymalnie, często wychodzi to na jaw dopiero przy rachunku za prąd albo przy całkowitej awarii. Narastające powoli problemy, takie jak stopniowy ubytek czynnika chłodniczego, zabrudzony wymiennik ciepła czy zużywający się zawór, długo pozostają niezauważone.

System, który nauczył się, jak wygląda prawidłowa praca danej pompy ciepła, potrafi wykryć odchylenia. Wie, jak zwykle zależą od siebie temperatura i ciśnienie w obiegu chłodniczym oraz ile prądu pobiera sprężarka w określonych warunkach. Gdy te zależności powoli się zmieniają, wskazuje to na problem, często na tygodnie lub miesiące przed tym, zanim sterownik zgłosi błąd.

Tym właśnie system uczący się różni się od klasycznego monitorowania. Tradycyjny sterownik zgłasza „Błąd E17: zbyt niskie ciśnienie", gdy problem już wystąpił. System uczący się mógłby przekazać komunikat: „W ciągu ostatnich czterech tygodni efektywność spadła o 3 procent. Prawdopodobna przyczyna to zabrudzony parownik. Zalecane czyszczenie w przyszłym miesiącu."

Badania są już zaawansowane

Przegląd 230 publikacji naukowych na temat zastosowania AI w budynkach wymienia wykrywanie i diagnostykę usterek wśród obszarów, w których AI przewyższa metody tradycyjne[8]. Systemy oparte na uczeniu głębokim (szczególnie rozbudowanych sieciach neuronowych) osiągają w automatycznej diagnostyce usterek instalacji grzewczych, wentylacyjnych i klimatyzacyjnych (ang. *heating, ventilation and air conditioning*, HVAC) bardzo wysoką trafność, choć większość badań korzysta z danych z symulacji lub laboratoriów, a nie z rzeczywistych budynków[9].

Szczególnie obiecujące jest wykrywanie tak zwanych ukrytych usterek (ang. *soft faults*), które nie powodują nagłej awarii, ale obniżają efektywność. Może to być lekko zabrudzony wymiennik ciepła, zacinający się zawór albo starzejąca się sprężarka. Prawdziwą wartością jest rozpoznanie takich problemów, zanim przez wiele miesięcy będą podnosić rachunki albo przerodzą się w poważną usterkę.

Krok dalej idzie przewidywanie, kiedy dany komponent prawdopodobnie ulegnie awarii. Niektóre elementy, na przykład części elektroniki sterującej pracą sprężarki czy zawór przełączający obieg podczas odszraniania, zużywają się w charakterystyczny sposób. Rozpoznanie tych wzorców pozwala zaplanować wymianę części tak, aby uniknąć zarówno niepotrzebnych kosztów, jak i nieplanowanej awarii.

W przemyśle takie systemy są już standardem. W przypadku domowych pomp ciepła wciąż są na etapie rozwoju, ale ich potencjał jest duży.

7. Współpraca z siecią elektroenergetyczną: obszar przyszłości

Pompy ciepła będą odgrywać coraz ważniejszą rolę w sieci elektroenergetycznej. Wytworzone przez nie ciepło można magazynować w samym budynku, wykorzystując jego masę termiczną, czyli zdolność ścian i stropów do gromadzenia ciepła. Można je też gromadzić w zasobniku ciepłej wody użytkowej lub w zbiorniku buforowym. Dzięki temu pompa ciepła nie musi pracować dokładnie wtedy, gdy potrzebne jest ciepło, i może pomagać w łagodzeniu szczytów zapotrzebowania na prąd.

Pokazuje to brytyjski projekt LATENT prowadzony przez Uniwersytet w Southampton. W badaniu terenowym w 30 domach pompy ciepła były zdalnie wyłączane lub ograniczane w godzinach największego obciążenia sieci, każdorazowo na 30 minut do 2 godzin. Pobór mocy spadł średnio o około 88 procent, temperatura w pomieszczeniach obniżyła się najwyżej o około 0,8 stopnia Celsjusza, a mieszkańcy bardzo rzadko korzystali z możliwości wyłączenia zdalnego sterowania[10]. Sterowanie opierało się przy tym na prostych regułach, a nie na AI.

Aby takie przesuwanie poboru prądu w czasie działało na dużą skalę, dłużej i bez utraty komfortu, potrzebne jest sterowanie z wyprzedzeniem. System musi wiedzieć, jaka będzie pogoda, kiedy mieszkańcy wrócą do domu i jak będą się zmieniać ceny prądu. Wtedy może wcześniej dogrzać budynek, gdy energii jest dużo i jest tania, a wstrzymać pracę, gdy sieć jest mocno obciążona. Tu właśnie połączenie sterowania predykcyjnego z uczeniem maszynowym, opisane w części 5 bloga, może wnieść realny wkład.

Podsumowanie

Dojrzała, sprawdzona technologia pomp ciepła może wiele zyskać dzięki sztucznej inteligencji.

Producenci mogą dzięki projektowaniu wspieranemu przez AI tworzyć wydajniejsze komponenty, a dzięki automatycznej analizie obrazu podnosić jakość produkcji. W przyszłości projektanci i instalatorzy będą mogli korzystać z narzędzi doboru opartych na danych z działających instalacji oraz z samouczących się systemów uruchamiania. Użytkownicy mogą zyskać dzięki regulacji dopasowującej się do budynku wyższą efektywność, większy komfort i niższe koszty eksploatacji. System energetyczny może skorzystać na inteligentnym przesuwaniu poboru prądu w czasie, zwłaszcza gdy pompy ciepła będą współpracować z magazynami energii i samochodami elektrycznymi.

Przy ocenie ofert warto odróżniać prawdziwą AI od systemów opartych na regułach, które jedynie nazywa się „AI”. Prawdziwa AI uczy się na danych, rozpoznaje wzorce i dostosowuje się bez programowania każdego kroku. Inteligentne sterowanie nie zawsze musi być jednak połączone ze

sztuczną inteligencją. Dobrze zaprojektowane algorytmy i optymalizacja matematyczna również przynoszą wymierne korzyści. Najważniejsze jest, aby wykorzystywać wszystkie dostępne metody, a zakres zastosowania prawdziwej AI będzie z czasem rósł.

Badania nad inteligentnym sterowaniem pomp ciepła są bardzo zaawansowane. Potwierdziły one wyższą efektywność dzięki regulacji dopasowującej się do budynku, wyraźne oszczędności kosztów dzięki przesuwaniu poboru prądu w czasie oraz obiecujące wyniki w wykrywaniu usterek. Potencjał jest więc realny, a jego pełne wykorzystanie w domowych pompach ciepła wymaga jeszcze czasu. Trzeba przy tym pamiętać, że AI rozwija się w ogromnym tempie, dlatego przedstawiony obraz pokazuje jedynie stan w chwili pisania tego artykułu i może się szybko zdezaktualizować.

Najważniejsze przesłania:

- AI może uzupełniać doświadczenie i intuicję inżynierów oraz pomagać w projektowaniu nowych, wydajniejszych komponentów. Takie metody są wykorzystywane coraz częściej.
- W przyszłości AI może wspierać dobór mocy pompy ciepła. Dziś stosuje się tu jednak najczęściej zwykłe algorytmy, a nie „prawdziwą" AI.
- Przy montażu AI odgrywa na razie niewielką rolę.
- Przy uruchomieniu AI może pomóc ustawić regulację, w tym krzywą grzewczą, optymalnie dla konkretnego budynku i jego mieszkańców, a nie „z zapasem".
- Im dłużej AI obserwuje pracę pompy ciepła, tym skuteczniej może ją nadzorować.
- AI może na bieżąco i bez dużego nakładu pracy wykrywać problemy, które w innym przypadku dałyby o sobie znać dopiero znacznie później.
- Inteligentne sterowanie może śledzić ceny prądu i dostosowywać pracę pompy ciepła tak, aby była jak najtańsza. W połączeniu z AI jego znaczenie będzie rosło wraz z liczbą urządzeń w domu, takich jak magazyny energii czy samochody elektryczne.

Źródła

[1] Mounier V., Picard C., Schiffmann J. (2018): Data-Driven Predesign Tool for Small-Scale Centrifugal Compressor in Refrigeration. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 140(12), 121011. https://doi.org/10.1115/1.4040845; omówienie wyników: Pessina L.-A. (2019): AI-designed heat pumps consume less energy. École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 3.07.2019. Dostępne pod adresem: https://actu.epfl.ch/news/ai-designed-heat-pumps-consume-less-energy/ [dostęp: 23.10.2026]

[2] Narowski P., Heim D., Mijakowski M. (2024): New External Design Temperatures and Geospatial Models for Poland and Central Europe for Building Heat Load Calculations. Energies, 17(16), 3905. https://doi.org/10.3390/en17163905 [dostęp: 23.10.2026]. Obecnie obowiązujące wartości projektowej temperatury zewnętrznej pochodzą z normy PN-82/B-02403.

[3] IEA HPT Annex 56 – Digitalization and IoT for Heat Pumps (b.d.): CEDAR – Cost Efficient heat pumps using DigitAl twins and Reinforcement learning. Karta projektu (Dania). Dostępne pod adresem: https://heatpumpingtechnologies.org/annex56/factsheets-provided-by-the-danish-team/ [dostęp: 23.10.2026]

[4] Zurich University of Applied Sciences (ZHAW) (2023): Automated Commissioning of Heat Pumps. Institute of Applied Mathematics and Physics (IAMP), projekt zakończony (02/2023–05/2023). Dostępne pod adresem: https://www.zhaw.ch/en/research/project/73687 [dostęp: 23.10.2026]

[5] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2024): AI-Controlled Heat Pumps Increase Efficiency. Informacja prasowa, 17.12.2024. Dostępne pod adresem: https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2024/ai-controlled-heat-pumps-increase-efficiency.html [dostęp: 23.10.2026]

[6] Tomás L., Lämmle M., Pfafferott J. (2025): Demonstration and Evaluation of Model Predictive Control (MPC) for a Real-World Heat Pump System in a Commercial Low-Energy Building for Cost Reduction and Enhanced Grid Support. Energies, 18(6), 1434. https://doi.org/10.3390/en18061434 [dostęp: 23.10.2026]

[7] Tomás L., Lämmle M., Pfafferott J. (2025): Demonstration and Evaluation of Model Predictive Control (MPC) for a Real-World Heat Pump System in a Commercial Low-Energy Building for Cost Reduction and Enhanced Grid Support. Energies, 18(6), 1434. https://doi.org/10.3390/en18061434 [dostęp: 23.10.2026]

[8] Boutabba A., Albalkhy W., Lafhaj Z., Roussel J., Yim P., Danel T. (2025): Enhancing Thermal Comfort and Energy Efficiency in Buildings Using Artificial Intelligence: A Systematic Literature Review. Modular and Offsite Construction (MOC) Summit Proceedings, Montreal, s. 53–62. https://doi.org/10.29173/mocs313 [dostęp: 23.10.2026]

[9] Zhang F., Saeed N., Sadeghian P. (2023): Deep learning in fault detection and diagnosis of building HVAC systems: A systematic review with meta analysis. Energy and AI, 12, 100235. https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100235

[10] Turner P.A.D., Rushby T.W., Manfren M. i in. (2025): Embedding energy flexibility capability in air source heat pumps via third-party control: Insights from a field trial on residential buildings in England. Applied Energy, 389, 125705. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125705; opis projektu: University of Southampton (b.d.): LATENT: Residential Heat as an Energy System Service. Dostępne pod adresem: https://www.southampton.ac.uk/research/projects/latent-residential-heat-as-an-energy-system-service [dostęp: 23.10.2026]