



NEURO
REGULATOR

Samoucząca się sztuczna inteligencja
dla węzłów ciepłych

 **ekoprojekt**[®]



POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Potrzeba matką Neuroregulatora®

Gwałtownie rosnące ceny energii oraz troska o środowisko naturalne, przeniosły zagadnienie optymalizacji efektywności energetycznej na sam szczyt agendy publicznej debaty i polityki.

Znalezienie skutecznych sposobów oszczędzania energii jest jednym z najważniejszych wyzwań XXI wieku. Przy malejących naturalnych zasobach energii i dramatycznie rosnących kosztach związanych z ich eksploatacją, polityka energetyczna w skali krajowej, jak i globalnej, awansuje do rangi priorytetowych działań podejmowanych zarówno przez poszczególne rządy, organizacje międzynarodowe, jak i biznes. Zarządzanie energią w budynkach staje się niezbędne dla zachowania stabilności klimatycznej, polepszenia bezpieczeństwa energetycznego Polski, Europy i świata.



*prof. nzw. dr hab. Witold Chmielnicki
Twórca Neuroregulatora*

Energia zużywana na cele ogrzewania stanowi bardzo istotną pozycję w budżecie odbiorców zbiorowych i indywidualnych.

Zwiększa to wagę zagadnień dotyczących minimalizacji zużycia energii, podnoszenia efektywności energetycznej, zarządzania energią, monitorowania i optymalizacji procesów sterowania.

Na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, pod kierunkiem prof. nzw. dr hab. Witolda Chmielnickiego, zrealizowano projekty badawcze dotyczące wykorzystania sieci neuronowych (tzw. sztucznej inteligencji) do optymalnego sterowania procesami cieplnymi w budynkach.

” Pilna potrzeba ograniczenia zużycia energii cieplnej przez budynki, oraz zwiększenia efektywności energetycznej systemów ciepłowniczych stała się inspiracją dla polskich naukowców i inżynierów.



Gmach Główny Politechniki Warszawskiej – procesami cieplnymi w budynku steruje Neuroregulator®



NEURO
REGULATOR

Neuroregulator®
- ultranowoczesne,
innowacyjne urządzenie
z zakresu sterowania
procesami cieplnymi
w budynkach, wykorzystujące
nowe zasady regulacji, oparte
o sieci neuronowe.

Wyniki badań były bardzo obiecujące, czego efektem było powstanie konsorcjum składającego się z **Politechniki Warszawskiej** - największej i najstarszej polskiej uczelni technicznej oraz **Ekoprojekt Sp. z o.o.** - renomowanej polskiej firmy inżynierskiej z branży ciepłowniczej, eksperta w dziedzinie efektywności energetycznej.

Współpraca zaowocowała realizacją projektu pt. „Wykorzystanie sieci neuronowych do sterowania procesów cieplnych w budynkach”, współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, w którego efekcie powstał **Neuroregulator®**.

Wraz z dedykowanym specjalistycznym oprogramowaniem **RN-WAECh** i zestawem urządzeń pomiarowych i regulacyjnych tworzą kompleksowy system, służący do inteligentnego zarządzania energią w budynkach podłączonych do sieci ciepłowniczych.



Neuroregulator® na tle obecnych rozwiązań

Wszystkie budynki podłączone do miejskich sieci ciepłowniczych wyposażone są w węzły cieplne, instalacje centralnego ogrzewania oraz ciepłej wody użytkowej, a czasem także w instalacje technologiczne. **W czasie pracy systemów dostarczających ciepło do pomieszczeń budynków zachodzą ciągłe, dynamiczne zmiany parametrów, spowodowane zmianą warunków zewnętrznych** (temperatura powietrza zewnętrznego, wilgotność, prędkość wiatru i in.), jak i wewnętrznych (dodatkowe zyski ciepła, zmienne zapotrzebowania na ciepło, zmienny rozbiór ciepłej wody użytkowej i in.).

Aby uzyskać wymagane parametry danego procesu w warunkach dynamicznych oraz aby ilość energii, jaka jest zużywana na poszczególne cele, odpowiadała rzeczywistym potrzebom, **konieczne jest odpowiednie sterowanie**. Za tę funkcję w każdym węźle cieplnym odpowiada sterownik, zwany także **regulatorem**.

Aktualnie w regulatorach węzłów ciepłowniczych wykorzystuje się standardowe algorytmy regulacji o działaniu proporcjonalnym (P), proporcjonalno-całkującym (PI) oraz proporcjonalno-całkująco-różniczkującym (PID). Zastosowanie tego typu regulatorów zapewniałoby dobrą jakość regulacji **tylko w przypadku współpracy z obiektami liniowymi**.

Niestety procesy regulacji występujące w obiektach cieplnych **mają właściwości nieliniowe** – dynamiczne, z czym tradycyjne algorytmy **nie potrafią sobie poradzić**.

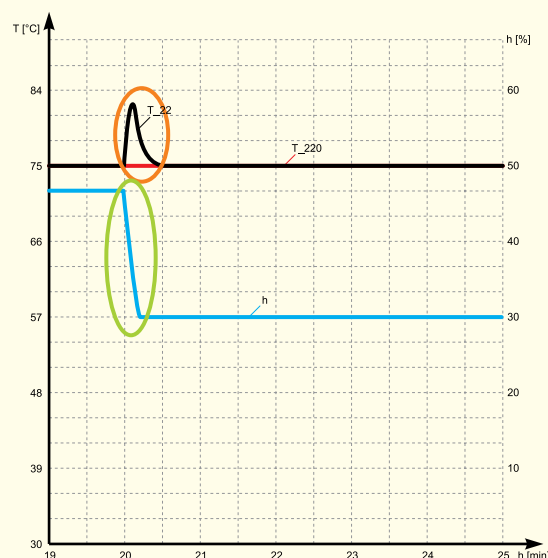
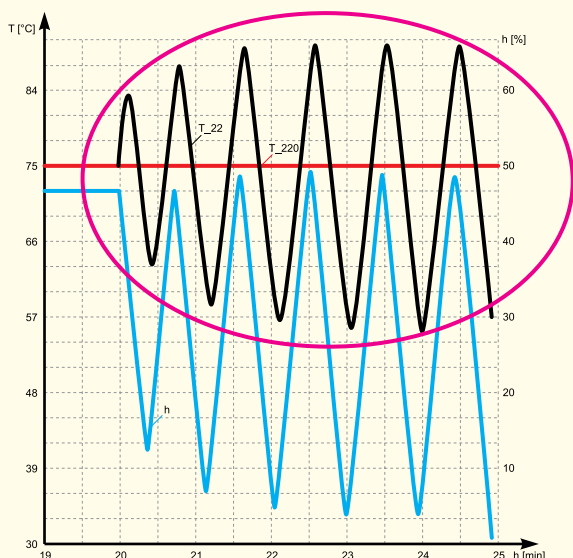
Aby polepszyć jakość regulacji, należałoby przy zmianie punktu pracy na skutek zmiany obciążenia, każdorazowo dokonać zmiany parametrów nastaw regulatora. Nie jest to oczywiście realne, gdyż w węźle cieplnym musiałby przebywać nieustannie technik odpowiedzialny za systematyczną zmianę nastaw regulatora lub w przypadku węzłów cieplnych wyposażonych w telemetrię – ciągłych zmian musiałby dokonywać zdalnie wyspecjalizowany operator, zatem koszty obsługi pochłonęłyby większość uzyskiwanych oszczędności.

W związku z tym, aby nie dopuścić do przebiegów niestabilnych, nastawiane jest najczęściej małe wzmocnienie regulatora, które powoduje, że **przebiegi regulacji stają się powolne i układ nie reaguje na pojawiające się zakłócenia**. A to prowadzi do nieprawidłowej pracy, strat ciepła i podwyższania kosztów ogrzewania.

Porównanie działania regulatora PID i Neuroregulatora:

Regulacja PID (nastawy regulatora jak w badaniu pierwszym), badania dla węzła c.o., temperatura zewnętrzna $t_{zew} = -15^{\circ}\text{C}$, T_{22} – wielkość regulowana – temperatura na zasileniu, T_{220} – wartość zadana, h – skok zaworu, jakość regulacji – układ niestabilny

Regulacja RN, badania dla węzła c.o., temperatura zewnętrzna $t_{zew} = -15^{\circ}\text{C}$, T_{22} – wielkość regulowana – temperatura na zasileniu, T_{220} – wartość zadana, h – skok zaworu, jakość regulacji – RMS; 1,74784, Wariancja: 0,999455, MAPE: 0,89271



Zamieszczone powyżej wykresy porównawcze pokazują, że **jakość regulacji układu z regulatorem neuronowym jest zdecydowanie lepsza niż przy zastosowaniu regulatora PID.**

W momencie zmiany punktu pracy układu, spowodowanego na przykład zmianą temperatury zewnętrznej, działanie regulatora neuronowego zapewni bardzo dobrą jakość, natomiast w układzie z regulatorem PID pojawia się widoczna na przebiegu duża niestabilność, a więc nie spełnia on podstawowego warunku stawianego układom regulacji. **Charakterystyczne dla działania regulatora neuronowego jest natychmiastowe dochodzenie do nowego stanu ustalonego, zwykle przez jednorazowe przestawienie zaworu.**

Typowy regulator stosowany obecnie w węzłach ciepłowniczych realizuje tylko podstawowe funkcje, w celu zapewnienia odpowiednich warunków, jakie są stawiane procesom cieplnym w budynkach. Podstawowym problemem, z jakim mamy do czynienia jest niezadowolający przebieg procesu regulacji. Często dochodzi do niestabilnej pracy, w czasie której występują oscylacje niegasnące wielkości regulowanych,

które są bardzo niekorzystne zarówno dla procesu technologicznego, jak też dla urządzeń regulacyjnych, gdyż mogą powodować ich awarię lub przedwczesne zużycie. Odchyłki statyczne, jak i dynamiczne, znacznie przekraczają dopuszczalne wartości.

Potwierdzają to wieloletnie badania prowadzone w układach rzeczywistych, co było przedmiotem wielu publikacji w czasopiśmie naukowych. **Takie działanie uniemożliwia racjonalne zarządzanie energią w budynkach.** Struktury układów regulacji stosowane w dotychczasowych rozwiązaniach są niestabilne, co wynika bezpośrednio z właściwości obiektu regulacji oraz elementów układu regulacji.

Stosowanie obecnych regulatorów bazujących na algorytmach typu PID oznacza ograniczoną paletę reakcji sterownika, a nade wszystko brak płynności procesów dostosowawczych. Sterowniki te cechują się wysoką amplitudą drgań dostosowawczych, co wydatnie **zwiększa pobór ciepła**, nieadekwatnie do wymaganych przez użytkownika potrzeb.

Zasada działania Neuroregulatora®

Sztuczne sieci neuronowe

W celu poprawy jakości regulacji węzłów cieplnych oraz dla racjonalnego wykorzystania energii dostarczanej do budynku, od wielu lat polscy inżynierowie pracowali nad innymi rozwiązaniami do sterowania procesów cieplnych.

W teorii regulacji automatycznej znane są tzw. zaawansowane algorytmy regulacji, jednak nie znalazły one zastosowania w układach ciepłowniczych. Duże zmiany parametrów określających właściwości statyczne i dynamiczne obiektu regulacji (szczególnie dotyczy to przepływowych wymienników ciepła, ale także samych budynków) skłaniały zatem do poszukiwania rozwiązań wykorzystujących sterowanie adaptacyjne. Szanse na takie rozwiązanie dały **sztuczne sieci neuronowe** (ang. Neural Network). Znajdują one coraz szersze zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki, takich jak biologia, medycyna i wojsko.

Prezentowana Państwu innowacyjna technologia to wykorzystanie **sztucznych sieci neuronowych w dziedzinie sterowania procesów cieplnych**. Głównym zadaniem Neuroregulatora® jest poprawa jakości regulacji w szerokim zakresie pracy układu, bez konieczności zmiany parametrów nastaw. Dotyczy to takich wskaźników określających jakość regulacji, jak: okres oscylacji, czas regulacji, w którym osiągnana jest wartość zadana, liczba oscylacji w czasie regula-

cji, szybkość tłumienia zakłóceń, przeregulowanie, odchylenie maksymalne i wiele innych. W przypadku sterowania procesów dynamicznych, z jakimi mamy do czynienia w układach ciepłowniczych, główną zaletą sieci neuronowych jest adaptacja do zmieniających się warunków, a dokonuje się tego poprzez ciągłe douczanie i poprawę efektów działania wraz z upływem czasu pracy, bez żadnych dodatkowych działań zewnętrznych.

Neuroregulatory® są urządzeniami predykcyjnymi, w których zastosowano inteligentne algorytmy regulacji, umożliwiające ciągłą identyfikację obiektu, co jest niezbędnym warunkiem do efektywnego zarządzania energią w budynkach oraz do zapewnienia odpowiedniej jakości regulacji procesów cieplnych. Odpowiednie algorytmy do sterowania dynamicznego węzłów ciepłowniczych dają jakość regulacji znacznie lepszą niż w przypadku wykorzystania algorytmów statycznych typu PID.

Neuroregulator® przeznaczony jest do sterowania węzłami ciepłowniczymi centralnego ogrzewania, ciepłej wody użytkowej i ciepła technologicznego, zasilanymi z scentralizowanych źródeł ciepła. **Sztuczna sieć neuronowa zapewnia lepsze warunki regulacji oraz szerszy zakres zastosowania niż regulatory PID.** Dzięki jego zastosowaniu nie występuje zjawisko niestabilności układów regulacji spowodowane działaniem zakłóceń.

Ulepszone wykonanie oraz stabilne i ograniczone do minimum przebiegi przejściowe zapewnią satysfakcję użytkownikom i umożliwią implementację algorytmów pozwalających na **znaczną oszczędność energii** w porównaniu do układów dotychczasowych z regulatorami tradycyjnymi typu PID. Sieć neuronowa zapewnia optymalną regulację układu, bez konieczności dokonywania zmian nastaw, zarówno w czasie uruchamiania układu, jak też w czasie zmiany warunków pracy.



Za wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej do regulacji układów ciepłowniczych przemawia bardzo ważna niekorzystna cecha regulacji tradycyjnej ze sprzężeniem zwrotnym. Charakteryzuje ją to, że działanie regulacji rozpoczyna się po wystąpieniu odchyłki, a więc błędu regulacji. W przypadku sterowania za pomocą sieci neuronowej jest inaczej - jej działanie wyprzedza wystąpienie odchyłki w układzie.

Sieć neuronowa jest układem otwartym, którego działanie jest uwarunkowane wcześniejszym stanem, a więc nie musi wystąpić odchyłka regulacji, aby nastąpiła aktywacja sieci.

Dobrze zaprojektowana i nauczona sieć potrafi uzyskać nowy stan równowagi tylko przez jedno przestawienie urządzenia wykonawczego, co nie jest możliwe w tradycyjnych układach regulacji. Ogranicza się w ten sposób awaryjność urządzeń, co bezpośrednio wpływa na koszty eksploatacyjne.

Jakość regulacji przy wykorzystaniu sieci neuronowej jest zdecydowanie lepsza niż przy zastosowaniu typowych algorytmów regulacji.

Cechą charakterystyczną sieci neuronowych jest poprawa efektów działania wraz z upływem czasu pracy.

Oznacza to, że na skutek działania adaptacyjnego uzyskuje się optymalną regulację danego procesu. Efektem tego jest oszczędność energii uzyskana w czasie eksploatacji budynku. Zależy ona od przeznaczenia budynku i może wynosić nawet ~20-30% w skali całego roku, przy zapewnieniu tych samych warunków cieplnych.

Ma to bezpośredni związek z kosztami ponoszonymi przez użytkowników danych obiektów. Niewątpliwą zaletą sieci neuronowych jest adaptacja do zmieniających się warunków pracy. Jeśli na przykład zmiane ulegnie przeznaczenie budynku, to po niedługim czasie sieć nauczy się nowych warunków bez żadnych dodatkowych działań zewnętrznych.

Zalety ekonomiczno – prawne zastosowania Neuroregulatorów®

Stosowanie Neuroregulatorów® ma szereg zalet, zarówno czysto ekonomicznych, takich jak niskie koszty wdrożenia, jak również zalet na płaszczyźnie społecznej. Oto najważniejsze z nich:



Niskie koszty wdrożenia

Są jednym z najbardziej konkurencyjnych przedsięwzięć zwiększających efektywność energetyczną. **Koszty inwestycyjne wdrożenia Neuroregulatora® są dużo niższe, niż w przypadku alternatywnych rozwiązań** (ocieplenie elewacji, wymiana okien, modernizacja sieci ciepłowniczych, oświetlenia itp.). Inwestycja zwraca się średnio w okresie poniżej 3 sezonów grzewczych.

Ograniczają zużycie ciepła

Potwierdzają to prowadzone badania. Dzięki zastosowaniu technologii sieci neuronowych, realne zmniejszenie zużycia ciepła w większości budynków może wynosić nawet 20 ÷ 30%.



Przyjazne dla środowiska

Służą ochronie i poprawie jakości środowiska naturalnego poprzez poprawę efektywności energetycznej systemów ogrzewania, a co za tym idzie redukcję emisji pyłów i CO₂.

Ograniczenie CO₂

Pozytywnie wpływają na realizację polityki zrównoważonego rozwoju, poprzez ułatwienie wdrożenia przyjętego przez Komisję Europejską „Planu przeciwdziałania zmianom klimatu”, zakładającego między innymi obniżenie poziomu emisji CO₂.





Konkurencyjny, polski produkt

Przyczyniają się do poprawy konkurencyjności polskiej gospodarki na rynku międzynarodowym. **Neuroregulator®** jest całkowicie polskim wynalazkiem, powstałym na Politechnice Warszawskiej, nie stosowanym dotychczas na świecie.

Zgodne z szeroką perspektywą rozwoju

Ich zastosowanie jest spójne z polityką Unii Europejskiej i Polskiego Rządu w zakresie efektywności energetycznej, w tym m.in. z Ustawą o efektywności energetycznej oraz aktami wykonawczymi do Ustawy.



Zgodne z normami UE

Umożliwiają osiągnięcie celów opisanych w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie efektywności energetycznej oraz Dyrektywie w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, które nakładają na kraje członkowskie obowiązek efektywnego wykorzystania ciepła, m.in. poprzez wdrażanie nowych, innowacyjnych technologii.



Zalety techniczne zastosowania Neuroregulatorów®

Analizując zalety techniczne zastosowania Neuroregulatorów® na główny plan wysuwają się automatyzacja i optymalizacja procesów. Do pozostałych zalet należy zaliczyć:

- ✓ Automatyczna **adaptacja nieliniowych procesów**, czyli ciągła optymalizacja algorytmów pracy węzła cieplnego i zasilanych z niego instalacji, dzięki funkcji samouczenia się,
- ✓ Automatyczna **adaptacja do zmiennych warunków występujących w tych procesach**,
- ✓ Automatyczna adaptacja różnych konfiguracji urządzeń ciepłowniczych,
- ✓ **Bezobsługowa praca**, wszystkie czynności mogą być w pełni zautomatyzowane i nie wymagają obecności operatora,
- ✓ **Dostosowanie** ilości dostarczanego ciepła do rzeczywistego zapotrzebowania,
- ✓ Kompensacja szeregu różnych zakłóceń występujących w tych procesach,
- ✓ **Duża szybkość działania**, związana z równoległym sposobem przetwarzania informacji i efektywnością stosowanych algorytmów,
- ✓ **Możliwość generalizacji**, czyli generowania właściwych odpowiedzi na dane nie zawarte w procesie uczenia,
- ✓ Znaczna redukcja drogi pokonywanej przez siłowniki, co w rezultacie znaczne **przedłuża żywotność zaworów i siłowników**,
- ✓ Zmniejszenie, a nawet **wyeliminowanie przeregulowania** oraz zmniejszenie czasu regulacji,
- ✓ Ograniczenie parametrów wejściowych do wielkości występujących w obecnych układach standardowych,
- ✓ Kompatybilność z siłownikami i zaworami regulacyjnymi oraz innymi urządzeniami o dotychczasowych konstrukcjach, co znacznie **ułatwia ich zastosowanie w istniejących obiektach**,
- ✓ Pełna **kontrola dotrzymywania parametrów dostawy energii cieplnej przez jej dostawcę** oraz parametrów temperatury powrotu wody sieciowej,
- ✓ Możliwość wprowadzania przez użytkownika dowolnych **programów oszczędności ciepła** (obniżanie parametrów ogrzewania i ciepłej wody w nocy, praca z priorytetem cwu pozwalająca na obniżenie mocy zamówionej na cwu, itp.),
- ✓ Bieżąca **kontrola i optymalizacja wielkości mocy zamówionej**.

Zarządzanie energią przez Neuroregulator® oraz system RN-WAECh

System RN-WAECh posiada szereg funkcjonalności dostępnych dla operatora oraz upoważnionych użytkowników po stronie Klienta, w tym:



ZDALNE NASTAWY AUTOMATYKI

Funkcja umożliwiająca prowadzenie zdalnych nastaw parametrów urządzeń automatyki, ograniczająca do niezbędnego minimum fizyczną obecność serwisantów przy urządzeniach



AUTOMATYCZNE OSTRZEGANIE O SYTUACJACH ANORMALNYCH

W przypadku wystąpienia sytuacji alarmowej system automatycznie (za pomocą wiadomości SMS lub e-mail) powiadomi o tym zdarzeniu użytkownika oraz służby serwisowe



CZASOWE HARMONOGRAMY PRACY

Niezwykle praktyczna i prosta w obsłudze funkcja planowania okresowego programu pracy urządzeń automatyki (np. dobowego lub tygodniowego), czyli efektywne zarządzanie zużyciem energii w zależności od charakterystyki użytkownika danego budynku



STATYSTYKA PRACY BUDYNKU I JEGO INSTALACJI

Ta funkcja umożliwia użytkownikowi wykonywanie analiz statystycznych istotnych ze względu na weryfikację prowadzonego zarządzania energią oraz poprawność pracy instalacji i urządzeń automatyki w budynku (system umożliwia m.in. generowanie wykresów dla dowolnie wybranych wartości parametrów pracy instalacji w zadanym przedziale czasowym)



ANALIZA MOCY ZAMÓWIONEJ

Funkcja pozwalająca w trybie ciągłym analizować przepływ czynnika grzewczego wynikającego z mocy zamówionej w celu weryfikacji ewentualnego przekroczenia ustalonego pułapu mocy zamówionej w danym budynku (po okresie grzewczym – na podstawie wygenerowanego przez system raportu możliwe będzie precyzyjne określenie właściwej mocy zamówionej)



PALETA DOSTĘPNYCH ANALIZ EKONOMICZNYCH ZUŻYCIA CIEPŁA

System umożliwia użytkownikowi analizę kosztów energii cieplnej dla dowolnego zakresu czasowego, uwzględniając zmiany taryf dostawcy; system przekazuje m.in. informację o zużyciu energii cieplnej w podziale na m², m³, jednostkowego użytkownika budynku, dzięki czemu możliwe jest porównywanie zużycia i kosztów energii cieplnej w różnych budynkach



WIZUALIZACJA TECHNOLOGII

Wizualizacja węzłów cieplnych z aktywnymi elementami informującymi o aktualnych parametrach pracy kluczowych urządzeń, informując także o sytuacjach alarmowych



BEZPIECZEŃSTWO

System posiada zabezpieczenia (m.in. rejestr logów) uniemożliwiające dostęp osobom nieuprawnionym; wszystkie operacje wykonywane przez użytkowników są rejestrowane i dostępne dla właściciela monitorowanego budynku



Kontakt

Ekoprojekt Sp. z o.o.
al. Krakowska 224
02-219 Warszawa
tel. 22-886-44-39
biuro@ekoprojekt.com

www.neuroregulator.pl
www.ekoprojekt.pl



Narodowe Centrum
Badań i Rozwoju



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

