ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: ELEKTRYKA z. 198 Nr kol. 1709

Marian HYLA
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

REGULACJA TEMPERATURY WANNY WODNEJ DO LABORATORYJNYCH BADAŃ BIOLOGICZNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę procesów regulacji temperatury wanny wodnej do laboratoryjnych badań biologicznych. Cechami charakterystycznymi obiektu są duże stałe czasowe oraz duże opóźnienia transportowe (rzędu minut) znacząco wpływające na procesy regulacyjne. Ze względu na zastosowanie urządzenia nagrzewanie i stabilizacja temperatury obwarowane są bardzo ostrymi kryteriami odnośnie do jakości procesu regulacji. Przedstawiono konstrukcję urządzenia. Omówiono realizowane w systemie procedury regulacji temperatury. Zaprezentowano wyniki pomiarów przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym.

WATER TUB TEMPERATURE CONTROL FOR BIOLOGICAL LABORATORY INVESTIGATIONS TESTS

Summary. In the paper temperature control processes of a water tub for laboratory biological investigations are presented. Both large time constants and large transportation delays (of the order of minutes) significantly influencing the control processes characteristic of the object. For the used equipment heating and temperature stabilization are determined by very strictly defined criteria according to the process control quality. The equipment structure is also presented . There are described procedures executed in the temperature control system. The presented measurement results were obtained from measurement taken on a real object.

1. WPROWADZENIE

Istotną cechą procesów elektrotermicznych jest ich dynamika o charakterze aperiodycznym z inercją wysokiego rzędu. Inercja ta, w powiązaniu z wielkością stałych czasowych, przekłada się na silne właściwości uśredniające obiektów grzewczych. Zauważalne są również opóźnienia transportowe związane z występowaniem w obiektach grzewczych magazynów energii cieplnej. Nieliniowość statyczna skutkuje zaś różnymi wartościami stałych czasowych dla procesu nagrzewania i stygnięcia.

Uproszczony model obiektu grzewczego można przedstawić jako połączenie części dynamicznej liniowej o transmitancji

$$G(s) = \frac{e^{-s\tau}}{\prod_{i=1}^{n}(1+sT_i)}, \tag{1}$$

gdzie: τ – opóźnienie,
n – rząd procesu,
T_i – stałe czasowe,
oraz części nieliniowej reprezentującej nieliniowość statyczną obiektu cieplnego w postaci charakterystyki statycznej

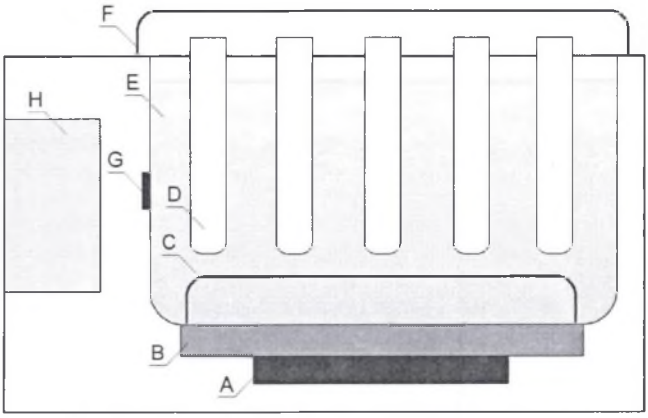
$$y = \varphi(x), \tag{2}$$

gdzie: x – sygnał wejściowy,
y – sygnał wyjściowy,
$\varphi(x)$ – funkcja nieliniowa.

Taki charakter obiektu stwarza znaczne trudności w procesie regulacji temperatury, szczególnie gdy wymagana jest dobra dynamika oraz duża dokładność procesu. Decydujący wpływ na przebieg procesu ma założone dopuszczalne przeregulowanie temperatury.

2. OBIEKT REGULACJI

Obiektem regulacji jest wanna wodna do laboratoryjnych badań biologicznych. Wanna wyposażona jest w grzałkę rezystancyjną o mocy 2 kW umieszczoną na spodzie urządzenia i oddzieloną od dna zbiornika płytą stalową. Na dnie zbiornika w kąpieli wodnej ułożona jest perforowana płytka miedziana. Płytka ta za względu na znacznie większą przewodność cieplną miedzi niż wody służy do wyrównania rozkładu temperatur w kąpieli wodnej. Pomiar temperatury kąpieli realizowany jest za pomocą czujnika temperatury typu PT-100 naklejonego na zewnętrznej części obudowy zbiornika. Konstrukcję obiektu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Laboratoryjna wanna wodna: A - grzałka, B - płyta stalowa, C - płyta miedziana, D - probówki z badanym materiałem, E - kąpiel wodna, F - pokrywa, G - czujnik temperatury, H- sterownik mikroprocesorowy z układem energoelektronicznym

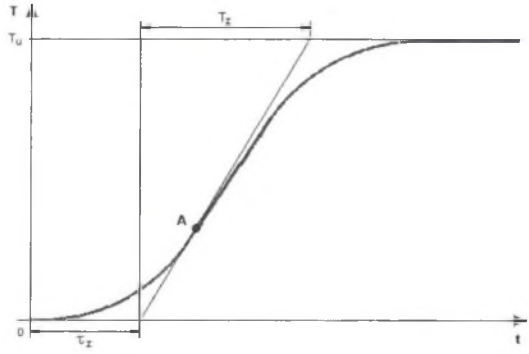
Fig. 1. Laboratory water tub: A - heater, B – steel sheet, C - copper sheet, D - test tubes with the examined material inside, E - water bath, F - cover, G - temperature sensor, H - microprocessor controller with powerelectronic circuit

Układ regulacji powinien zapewnić osiągnięcie zadanej temperatury kąpieli wodnej bez przeregulowań, w zakresie od temperatur biologicznych do temperatur rzędu 100°C w możli-

wie najkrótszym czasie oraz utrzymywanie stałej wartości temperatury z dokładnością ±0,2°C przez zadany czas. Ze względu na charakter badań związanych z hodowlą bakterii oraz badaniem żywotności kultur bakteryjnych w określonych temperaturach bardzo ostre staje się kryterium pracy bez przeregulowań i oscylacji temperatury kąpieli wodnej. Jakiekolwiek przeregulowanie ponad wartość zadaną temperatury prowadzi do obumarcia jednych kultur bakteryjnych, a rozwoju innych. Zmniejszenie przeregulowań w procesie regulacji prowadzi zwykle do znacznego wydłużenia czasu osiągnięcia wartości zadanej. Jednak założony proces powinien odbywać się w możliwie najkrótszym czasie.

3. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU REGULACJI

Cechą charakterystyczną obiektów cieplnych jest występowanie opóźnień transportowych oraz stałych czasowych. Typową odpowiedź obiektu cieplnego na włączenie mocy grzewczej przedstawiono na rys. 2.

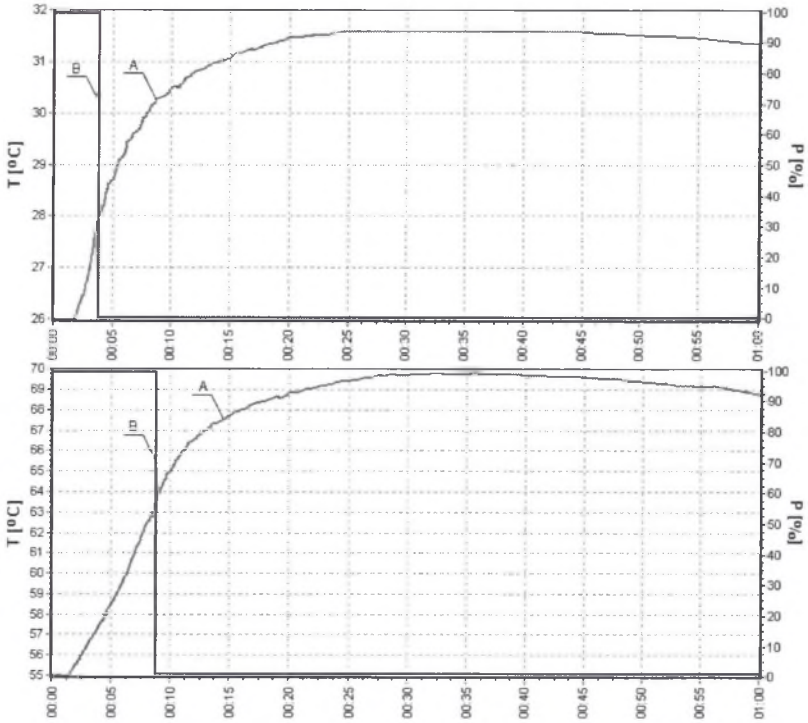


Rys. 2. Typowa odpowiedź obiektu cieplnego na włączenie mocy grzewczej: T_u - temperatura ustalona, T_z - zastępcza stała czasowa, τ_z - zastępcze opóźnienie, A - punkt przegięcia

Fig. 2. Typical reaction of the thermal object to switching on heating power: T_u - steady temperature, T_z - equivalent time constant, τ_z - equivalent delay, A - inflexion point

W celu identyfikacji parametrów obiektu przeprowadzono próby nagrzewania kąpieli wodnej polegające na załączeniu pełnej mocy grzewczej, a następnie jej wyłączeniu po określonym czasie. Odpowiedź temperaturowa obiektu pozwoliła na oszacowanie stałych czasowych oraz wartości opóźnienia transportowego. Oszacowane na podstawie przeprowadzonych pomiarów opóźnienie transportowe wynosi około 3 minut. Przebiegi pomiarowe odpowiedzi układu na włączenie i wyłączenie mocy grzewczej przedstawiono na rys. 3.

Zauważalny jest znaczny wpływ opóźnienia transportowego objawiający się tym, że dopiero po pewnym czasie od momentu rozpoczęcia dostarczania ciepła do układu rejestrowany jest wzrost temperatury. Związane jest to z procesem przekazywania ciepła do kąpieli wodnej. W pierwszej kolejności nagrzewana jest grzałka, następnie stalowa płyta umieszczona pod dnem wanny, a dopiero potem obudowa wanny i kąpiel wodna.



Rys. 3. Odpowiedź układu na włączenie i wyłączenie mocy grzejnej: A - temperatura kąpieli wodnej, B - moc dostarczana do układu

Fig. 3. System reaction to switching on and off heating power: A - water bath temperature, B - system input power

Stwierdzono również, że czas, po którym obserwuje się zmianę temperatury kąpieli, zależy od ilości energii zgromadzonej w pojemności cieplnej płyty stalowej w trakcie poprzedniego procesu grzewczego, a zatem czas pierwszych zmian temperatury kąpieli zależny jest od przerwy pomiędzy poszczególnymi procesami grzewczymi. Całkowite oddanie ciepła do otoczenia następuje dopiero po 24-godzinnej przerwie w pracy urządzenia. Przy cyklicznej pracy urządzenia nie można więc przewidzieć czasu (a co za tym idzie, energii dostarczonej do układu), po którym w początkowej fazie cyklu grzewczego nastąpi pierwsza zmiana temperatury kąpieli wodnej. W tej fazie procesu obiekt zachowuje się jak obiekt ze zmiennym opóźnieniem transportowym. Stwarza to dodatkowe problemy w przypadku nagrzewania o niewielkie przyrosty temperatur.

Przy pełnej mocy grzewczej dostarczanej do układu przyrost temperatury w pobliżu punktu przegięcia charakterystyki nagrzewania wynosi około 1,5°C/min. Po wyłączeniu mocy grzewczej następuje dalszy przyrost temperatury spowodowany energią zgromadzoną w pojemnościach cieplnych urządzenia

Urządzenie pozbawione jest wymuszonego chłodzenia, w związku z tym możliwe jest jedynie dostarczanie ciepła do kąpieli wodnej, natomiast odprowadzanie odbywa się poprzez wymianę ciepła z otoczeniem. W trakcie prób nagrzewanie do temperatur biologicznych (36-38°C) stwierdzono, że po osiągnięciu temperatury ustalonej temperatura kąpieli wodnej otrzymuje się praktycznie bez zmian przez około 30 minut. W związku z tym jakiekolwiek przeregulowanie w procesie nagrzewania jest niemożliwe do skorygowania przez układ regula-

cji dla założonej jakości procesu. Dla tego zakresu temperatur o spełnieniu warunków stawianych układowi regulacji decyduje właściwe dojście do temperatury zadanej.

Stwierdzono także znaczną zależność pomiędzy temperaturą ustaloną kąpieli a temperaturą otoczenia. Urządzenie nie ma możliwości pomiaru temperatury otoczenia, co uniemożliwia uzależnienie procesu grzewczego od tego parametru.

Inne zachowanie się układu występuje przy nagrzewaniu do temperatur rzędu 70÷90°C. Po osiągnięciu temperatury maksymalnej stan ustalony występuje przez około 20 sekund, a następnie temperatura kąpieli spada.

Dla tego zakresu temperatur o spełnieniu warunków stawianych układowi regulacji decyduje głównie dostarczanie w stanie ustalonym właściwej ilości energii potrzebnej na pokrycie strat powstałych w związku z wymianą ciepła z otoczeniem.

Jak należało się spodziewać, znaczna jest nieliniowość zależności temperatury kąpieli od dostarczonej mocy, wynikająca ze zmian ilości oddawanego ciepła do otoczenia w zależności od różnicy temperatur. Dodatkowo obiekt jest niestacjonarny ze względu na procesy parowania czy zmiany temperatury otoczenia w wyniku przekazywania ciepła do otoczenia.

Na przedstawionych na rys. 3 przebiegach pomiarowych można zauważyć, że krzywa nagrzewania nie jest gładka i występują na niej okresy szybszych i wolniejszych zmian temperatury. Przeprowadzając jednoczesne pomiary temperatur w kilku punktach kąpieli wodnej stwierdzono, że w trakcie nagrzewania na skutek procesów przekazywania ciepła występują stochastyczne chwilowe przyrosty temperatur, a różnice temperatur w poszczególnych punktach kąpieli wodnej dochodzą do 2°C. Jednak w miarę dochodzenia do stanu ustalonego różnice te zanikają, a w stanie ustalonym temperatura w każdym punkcie kąpieli wodnej jest praktycznie identyczna. Pozwala to na zastosowanie jednego czujnika temperatury umieszczonego w dowolnym miejscu obudowy wanny.

4. PODSTAWOWY ALGORYTM REGULACJI

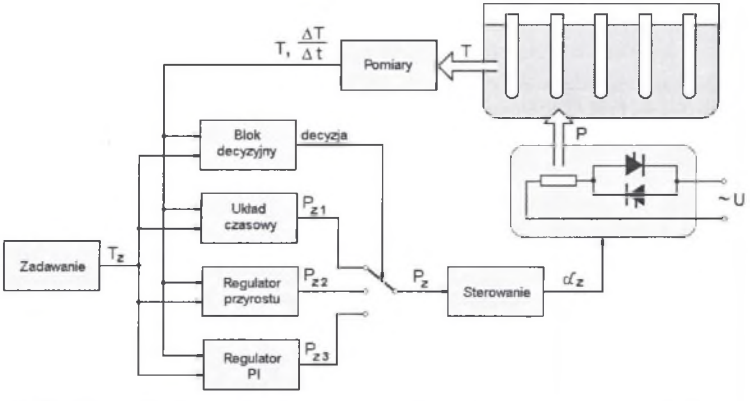
Głównym problemem układu regulacji temperatury laboratoryjnej wanny wodnej są kilkuminutowe opóźnienia transportowe, co przy narzuconej dokładności regulacji temperatury rzędu ±0,2°C oraz wymaganiu osiągnięcia temperatury zadanej bez przeregulowania w akceptowanym czasie powoduje, że tradycyjny układ regulacji oddziałujący na obiekt w zależności od wartości chwilowej błędu regulacji nie spełnia stawianych wymagań odnośnie do jakości procesu.

Przeprowadzone próby realizacji regulatorów z nastawami wyznaczonymi za pomocą powszechnie stosowanych kryteriów nie dały zadowalających rezultatów.

Na podstawie szeregu badań doświadczalnych opracowano algorytm regulacji pozwalający na osiągnięcie zadanej temperatury kąpieli wodnej w akceptowalnym przedziale czasu bez przeregulowania oraz stabilizację temperatury z założoną dokładnością. Schemat blokowy struktury układu regulacji przedstawiono na rys. 4.

Początkowy etap procesu nagrzewania zależny jest od temperatury początkowej kąpieli wodnej oraz różnicy temperatur pomiędzy temperaturą początkową a temperaturą zadaną. Jeżeli różnica pomiędzy temperaturą początkową a temperaturą zadaną jest mniejsza od określonego progu, do układu dostarczana jest pełna moc grzewcza przez określony czas. Ten etap procesu realizowany jest w przypadku, gdy dla małych różnic pomiędzy temperaturą początkową a temperaturą zadaną, ze względu na występujące w układzie opóźnienia transportowe, reakcja na zmianę temperatury kąpieli zarejestrowana przez układ pomiarowy

byłaby reakcją spóźnioną, gdyż energia cieplna dostarczona do pojemności cieplnych urządzenia byłaby zbyt duża, co w efekcie skutkuje przeregulowaniem.



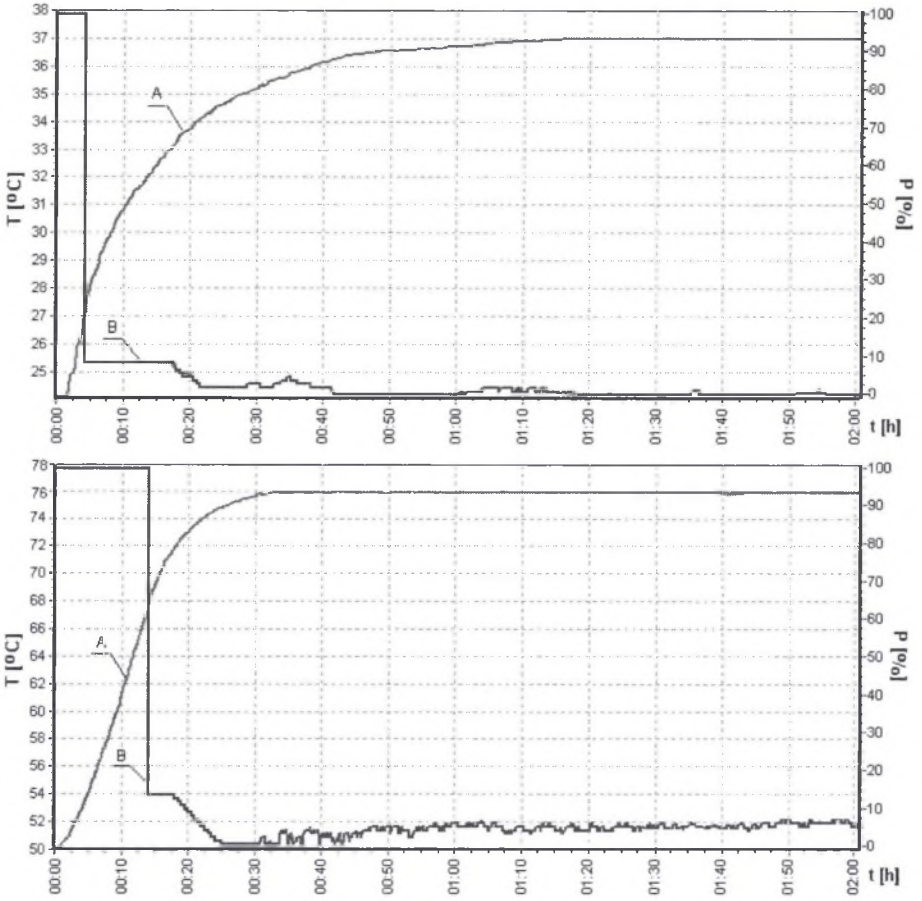
Rys. 4. Struktura układu regulacji temperatury laboratoryjnej wanny wodnej
Fig. 4. Temperature control system structure of laboratory water tub

W przypadku gdy w trakcie włączenia do pracy różnica pomiędzy temperaturą początkową a temperaturą zadaną jest większa od przyjętego progu, pełna moc grzewcza dostarczana jest do momentu osiągnięcia przez kąpiel temperatury drugiego progu określonego w układzie decyzyjnym. W dalszym etapie moc grzewcza dostarczana do układu kontrolowana jest przez regulator przyrostu temperatury, którego zadaniem jest doprowadzenie temperatury kąpieli do temperatury zadanej z określoną szybkością. Przy temperaturze o 0,1°C niższej od temperatury zadanej kontrolę nad stabilizacją temperatury przejmuje regulator typu PI.

W trakcie stabilizowania temperatury, ze względu na to, że układ znajduje się w stanie równowagi termicznej, tzn. tyle samo energii dostarczanej jest do kąpieli, ile oddawanej do otoczenia, niewielkie zmiany mocy grzejnej (rzędu 1%) są w stanie stabilizować temperaturę kąpieli w granicach ±0,1°C.

Aby utrzymać zadaną dokładność stabilizacji temperatury, konieczna jest jak najwcześniejsza reakcja układu regulacji już na najmniejsze zmiany temperatury rozpoznawane przez układ pomiarowy. Na podstawie szeregu doświadczeń stwierdzono, że takie zadnie najlepiej realizuje regulator PI z dużym wzmocnieniem i dużej stałej czasowej. Część proporcjonalna regulatora reaguje na chwilowe wahania temperatury kąpieli, natomiast część całkująca na trend tych zmian.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów zarejestrowane w trakcie procesów grzewczych wykorzystujących opracowany algorytm regulacji. Charakterystyczną cechą przebiegów jest powiązanie zadanej szybkości przyrostu temperatur w czasie z zadaną temperaturą kąpieli. Ze względu na to, że dla wyższych temperatur kąpieli występuje bardziej intensywna wymiana ciepła z otoczeniem, dojście do temperatury zadanej może być realizowane z większą prędkością niż dla temperatur niższych, gdzie oddawanie ciepła do otoczenia jest minimalne. Po osiągnięciu temperatury zadanej układ regulacji stabilizuje temperaturę kąpieli wodnej na zadanym poziomie.

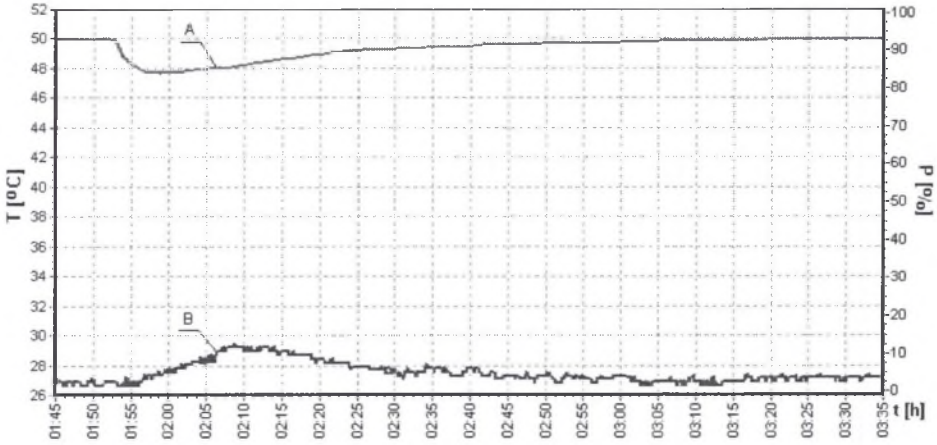


Rys. 5. Przebiegi pomiarowe procesu regulacji temperatury wanny wodnej wg opracowanego algorytmu regulacji: A - temperatura kąpieli wodnej, B - moc dostarczana do układu

Fig. 5. Water tub temperature controll process according to the worked out controll algorithm: A - water bath temperature, B - input power system

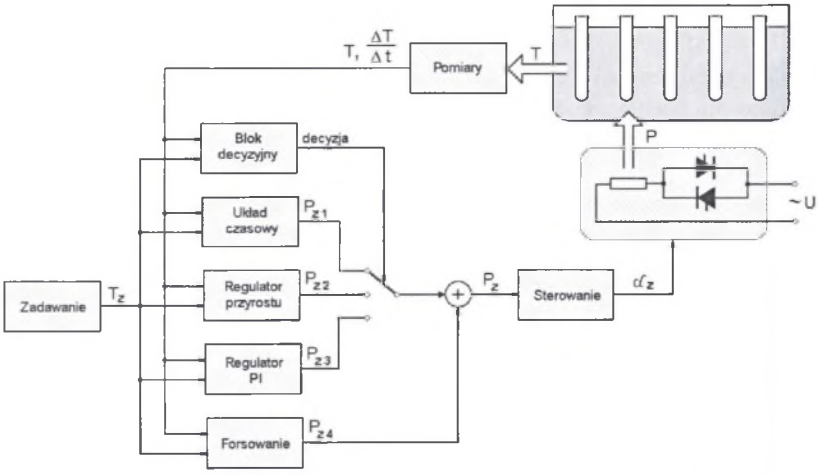
5. MODYFIKACJA ALGORYTMU REGULACJI

Procesy badawcze prowadzone z wykorzystaniem laboratoryjnej wanny wodnej polegają zarówno na włożeniu wsadu z badanym materiałem biologicznym do zimnej kąpieli, a następnie podgrzaniu jej do ustalonej temperatury, jak i na włożeniu wsadu do kąpieli o wcześniej ustalonej temperaturze. W drugim z przypadków działanie zaprezentowanego układu regulacji nie spełnia wymagań związanych z dynamiką procesu. Po włożeniu wsadu do kąpieli następuje znaczne obniżenie temperatury, rzędu kilku °C oraz bardzo wolny powrót do temperatury zadanej. Przykładowy przebieg pomiarowy przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Reakcja układu na włożenie badanego materiału w temperaturze ustalonej: A - temperatura kąpieli wodnej, B - moc dostarczana do układu
Fig. 6. System reaction to inserting the examined material at steady temperature: A - water bath temperature, B - input power system

Aby poprawić dynamikę układu w takim przypadku, wprowadzono modyfikację struktury układu regulacji polegającą na dodaniu niezależnego bloku forsującego. Zmodyfikowaną strukturę układu regulacji przedstawiono na rys. 7.

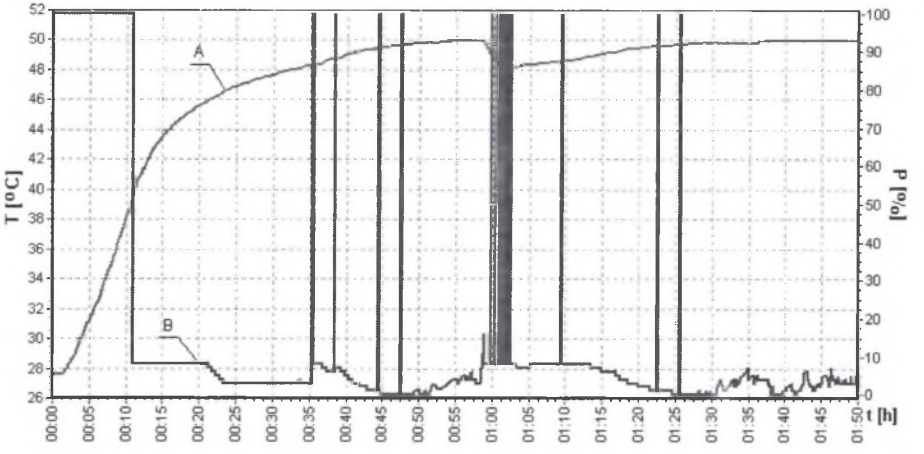


Rys. 7. Zmodyfikowana struktura układu regulacji temperatury wanny wodnej
Fig. 7. Modified structure of water tub temperature control system

Działanie układu forsującego polega na impulsowym dostarczeniu pełnej mocy grzewczej do układu w przypadku stwierdzenia przez układ decyzyjny pogorszenia się dynamiki procesu regulacji. Nie wpływa to na wartość sygnałów wyjściowych bloków innych regulatorów. Ze względu na znaczne opóźnienie transportowe obiektu, po zadziałaniu układ forsowania blokowany jest na pewien okres, aby energia dostarczona do układu impulsem forsującym spowodowała widoczną zmianę temperatury, która mogłaby zostać zarejestrowana przez układ po-

miarowy. Blok forsujący pozwala na zwiększenie dynamiki zarówno procesu nagrzewania, jak i procesu stabilizacji temperatury w momencie włożenia wsadu z badanym materiałem do kąpieli wodnej z zachowaniem jednocześnie pracy bez przeregulowań.

Na rys. 8. przedstawiono przebiegi pomiarowe procesu regulacji temperatury przy zmodyfikowanej strukturze układu regulacji.



Rys. 8. Proces regulacji temperatury wanny wodnej z wykorzystaniem bloku forsującego przy włożeniu badanego materiału w temperaturze ustalonej: A - temperatura kąpieli wodnej, B - moc dostarczana do układu

Fig. 8. Water tub temperature control process with forcing block usagewhen inserting the examined material at steady temperature: A - water bath temperature, B - input power system

6. PODSUMOWANIE

Pomimo ostrych ograniczeń narzuconych na procesy grzewcze laboratoryjnej wanny wodnej oraz trudności ze spełnieniem stawianych wymagań, głównie ze względu na znaczne opóźnienia transportowe występujące w obiekcie, zastosowany algorytm regulacji pozwolił na pracę urządzenia z założonymi parametrami. Dokładność stabilizacji temperatury rzędu ±0,1°C wydaje się granicą, z jaką może być realizowany przedstawiany proces, zarówno ze względu na charakter obiektu, jak i na dokładność czujników pomiarowych temperatury. Modyfikacja algorytmu regulacji uwzględniająca blok forsujący znacznie poprawiła dynamikę procesu grzewczego pozwalając jednocześnie zachować pracę bez przeregulowania.

LITERATURA

1. Hering M.: *Podstawy elektrotermii.* WNT, Warszawa 1992.
2. Hyla M.: *Regulacja temperatury obiektu ze znaczącym opóźnieniami transportowymi.* Konferencja Postępy w Elektrotechnice Stosowanej PES-5, Kościelisko , 20-24.06.2005.

3. Michalski L., Kuźmiński K., Sadowisk J.: *Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych.* WNT, Warszawa 1981.
4. Skoczowski S.: *Technika regulacji temperatury.* Pomiary Automatyka Kontrola, Warszawa-Zielona Góra 2000.

Recenzent: Dr hab. inż. Kazimierz Buczek,
prof. Politechniki Rzeszowskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 października 2005 r.