

Marcin WESOŁOWSKI*
Bartosz MIKUŁOWICZ*
Przemysław SKRZYPCZAK**
Jacek HAUSER**

MODEL BEUKENA W ZAGADNIENIACH BADAŃ REGULATORÓW TEMPERATURY

Laboratoryjne badania układów regulacji temperatury urządzeń elektrotermicznych są zazwyczaj czasochłonne. Fakt ten wynika ze znacznych wartości stałych czasowych rzeczywistych układów grzejnych. Jedną z możliwości efektywnego ograniczania czasu pomiarów jest wykorzystanie modeli analogowych, umożliwiających dokładne odzwierciedlenie warunków pracy urządzeń elektrotermicznych, w zróżnicowanych skalach czasu. Niekwestionowaną zaletą modeli tej klasy jest możliwość dowolnego kształtowania dynamiki przebiegów czasowych prądów i napięć, oraz dopasowania modeli do układów wyjściowych badanych regulatorów. W niniejszym artykule zaproponowano wykorzystanie uniwersalnego modelu Beukena, sprzężonego z układem regulacji zaimplementowanym w sterowniku PLC, do badania charakterystyk statycznych i dynamicznych zróżnicowanych typów regulatorów. Możliwość rejestracji i porównania przebiegów czasowych wielkości regulowanej oraz sygnałów sterujących, pozwala na wybór racjonalnego algorytmu sterowania, oraz nastaw regulatora, gwarantujących spełnienie warunków określonych przez użytkownika.

SŁOWA KLUCZOWE: regulacja temperatury, model analogowy RC, symulacja

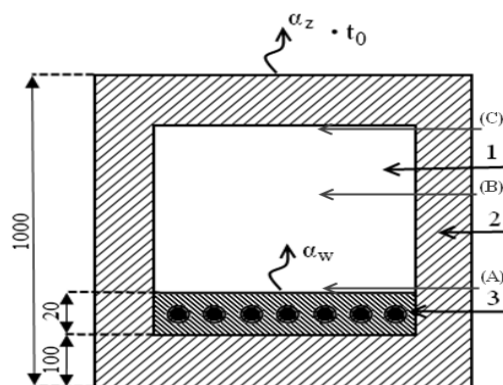
1. WPROWADZENIE

Większość procesów realizowanych w przemysłowych urządzeniach elektrotermicznych wymaga realizacji założonych programów grzejnych lub utrzymywania temperatury z wymaganą dokładnością. Zagadnienia te realizowane są najczęściej przez dedykowane regulatory temperatury. Spośród wielu spotykanych typów układów regulacji, najbardziej rozpowszechnione są regulatory dwustawne, proporcjonalne oraz proporcjonalno – różniczkująco – całkujące (PID) [1]. Wszystkie z wymienionych algorytmów regulacji charakteryzują się względną prostotą, niewielką liczbą nastrajanych parametrów oraz możliwością uzyskiwania wysokiej jakości regulacji. Wymienione zalety, w połączeniu z uniwersalnością (zwłaszcza regulatorów PID), sprawiły, iż są one chętnie wykorzystywane, zarówno w aplikacjach przemysłowych, jak i komunalno – bytowych.

* Politechnika Warszawska.

** Politechnika Poznańska.

Niezmiernie istotnym zagadnieniem przy doborze układu regulacji temperatury jest optymalny dobór strojonych nastaw regulatorów [1, 2]. W celu prezentacji tej problematyki, dokonano obliczeń symulacyjnych zróżnicowanych regulatorów. Wykorzystano model numeryczny pieca, zgodnie z rysunkiem 1.



Rys. 1. Geometria analizowanego modelu pieca. 1- wnętrze pieca (atmosfera gazowa); 2- izolacja termiczna; 3- element grzejny; α_z , α_w - współczynniki przyjmowania ciepła; A, B, C – lokalizacja czujników temperatury

Model składa się z warstwy izolacji cieplnej oraz elementu grzejnego. Założono oddawanie ciepła przez konwekcję i radiację, zarówno do wnętrza komory grzejnej ($\alpha_w = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$) jak i do otoczenia ($\alpha_z = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$) o stałej temperaturze $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Rozpatrywano zagadnienie nieustalonego przewodzenia ciepła, zgodnie z równaniem Fouriera – Kirchoffa (1) [3]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{p_v}{c\rho} + \frac{\lambda}{c\rho} (\nabla^2 t) \quad (1)$$

gdzie: c - ciepło właściwe, ρ - masa właściwa, λ - przewodność cieplna właściwa, t - temperatura, τ - czas, p_v - objętościowa gęstość mocy.

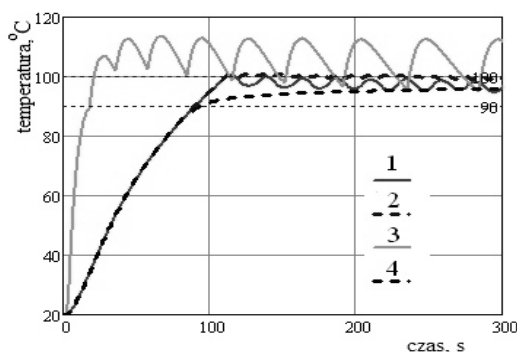
Obliczenia wykonano przy wykorzystaniu autorskiego algorytmu zaimplementowanego w programie MatchCAD. Wykorzystano metodę różnic skończonych z krokiem w tył, charakteryzującą się niewrażliwością na wartość kroku czasowego przyjmowanego do obliczeń [4]. Na rysunku 2 zaprezentowano charakterystyki temperaturowo – czasowe zarejestrowane we wnętrzu pieca, w przypadku poprawnie oraz niepoprawnie skonfigurowanych regulatorów dwustawnych oraz PID.

W przypadku regulatorów dwustawnych, jedynym strojonym parametrem jest szerokość pętli histerezy. Wielkość ta może być dowolnie zmieniana i nie wpływa istotnie na jakość regulacji określoną zależnością (2). Zgodnie z zaprezentowanymi obliczeniami, w przypadku obiektów o wysokich

wartościach mocy grzejnych, odniesionych do pojemności cieplnej, stosowanie regulacji dwustawnej prowadzi do wzrostu błędów regulacji.

$$R = H + (\tau_o / T_N)t_g \quad (2)$$

gdzie: R- rozrzut regulacji, H- szerokość pętli histerezy, t_g - temperatura graniczna, T_N - stała czasowa, τ_o - czas opóźnienia.



Rys. 2. Charakterystyki czasowo – temperaturowe uzyskane w wyniku symulacji działania regulatora dwustawnego dobranego w sposób poprawny (1) i niepoprawny (3), oraz regulatora typu PID o optymalnie (2) i nieoptymalnie (4) dobranych nastawach

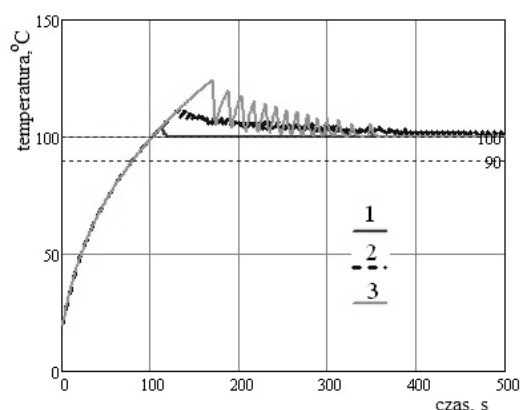
W większości przypadków poprawa jakości regulacji możliwa jest dzięki wykorzystaniu algorytmu PID [1], o charakterystyce określonej zależnością (3):

$$u(\tau) = K_R \varepsilon(\tau) + \frac{1}{T_i} \int_0^{\tau} \varepsilon(\tau) d\tau + T_D \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \quad (3)$$

gdzie: K_R - wzmacnienie proporcjonalne, T_i - czas wyprzedzenia, T_D - czas zdwojenia, ε - odchyłka temperatury od wartości zadanej, u - wyjście regulatora PID.

W przypadku tego algorytmu, istotnym zagadnieniem jest optymalny dobór nastaw parametrów strojonych (K_R , T_i , T_D). Zaprezentowane obliczenia (rys. 1) potwierdzają, iż niepoprawne nastawy regulatora PID wpływają negatywnie na rozrzut temperatur wokół wartości zadanej oraz na czas regulacji. Zagadnienia związane z racjonalnym doбором strojonych parametrów regulatorów temperatury wymagają zazwyczaj identyfikacji obiektu. Działanie to ma na celu znalezienie zastępczych parametrów pieca oraz dobór odpowiednich nastaw, przy wykorzystaniu jednego z kryteriów optymalizacyjnych. Zagadnienie to omówiono szeroko, m. in. w pracach [1, 5]. Na uwagę zasługuje fakt, iż realizacja doboru nastaw jest skomplikowana, z uwagi na znaczne stałe czasowe oraz perturbacje większości urządzeń elektrotermicznych. Większość dostępnych regulatorów posiada możliwość automatycznego doboru nastaw. Tym niemniej, dobre wartości zależne są od temperatury roboczej a proces trwa stosunkowo długo.

Kolejnym ważnym czynnikiem wpływającym na jakość regulacji jest lokalizacja przetwornika temperatury. Przy wykorzystaniu modelu numerycznego, zgodnego z ideą pokazaną na rysunku 1, dokonano obliczeń niestacjonarnego pola temperatury w piecu dla różnych lokalizacji czujnika temperatury (A, B, C na rys. 1). Wyniki pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przebiegi temperatury w piecu przy zróżnicowanej lokalizacji czujnika temperatury.
1- czujnik zlokalizowany w punkcie A (rys. 1); 2- czujnik zlokalizowany w punkcie B (rys. 1);
3- czujnik zlokalizowany w punkcie C (rys. 1)

Jak wykazano, stan temperatury wnętrza każdego komorowego urządzenia grzejnego zależy od rodzaju układu regulacji, jego nastaw, oraz lokalizacji czujnika temperatury, wykorzystywanego jako element systemu regulacji. Oczywiście lista ta nie uwzględnia szeregu czynników dodatkowych, jak konstrukcja pieców czy rodzaj stosowanego przetwornika elektrotermicznego, które istotnie determinują warunki funkcjonowania konkretnego urządzenia grzejnego. Tym niemniej, wymienione czynniki stanowią kompletny zestaw danych, istotnych z punktu widzenia celu niniejszej pracy.

2. STANOWISKO DO BADANIA UKŁADÓW REGULACYJNYCH

Na podstawie obliczeń zaprezentowanych w poprzednim rozdziale, wykazano konieczność wykonywania długotrwałych badań umożliwiających poprawny dobór nastaw regulatorów temperatury. Zazwyczaj proces identyfikacji wykonuje się na drodze analiz numerycznych [1] lub pomiarów rzeczywistego urządzenia [3]. W obu przypadkach, czas potrzebny do wykonania rzetelnych badań jest znaczny.

W niniejszym artykule zaproponowano konstrukcję modelu analogowego typu nieciągła przestrzeń – ciągły czas (model Beukena) [6, 7], umożliwiającego symulację obiektów elektrotermicznych sprzężonych z

dowolnym regulatorem temperatury. Możliwość tworzenia modeli analogowych wynika z matematycznego podobieństwa równań z zakresu termokinytyki oraz elektrotechniki. Rozwiązanie równania przewodzenia ciepła (1) dla pól ekwiskalnych może być zaprezentowane w postaci (4).

$$t = t_p - (t_p - t_U) e^{-\frac{\tau_t}{N}} = t_p - (t_p - t_U) e^{-\frac{\tau_t}{WC}} \quad (4)$$

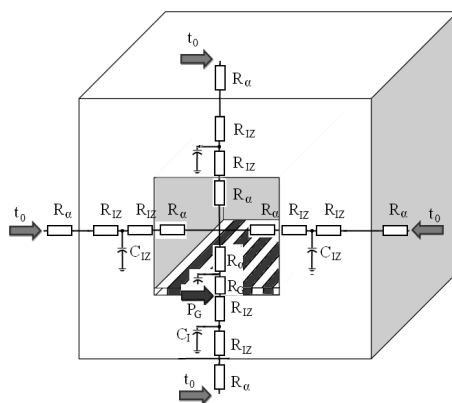
gdzie: t_p - temperatura początkowa, t_U - temperatura końcowa, N - stała czasowa, W - opór cieplny, C - pojemność cieplna.

Rozwiązanie to jest analogiczne do równania opisującego proces rozładowywania kondensatora w obwodzie RC (5):

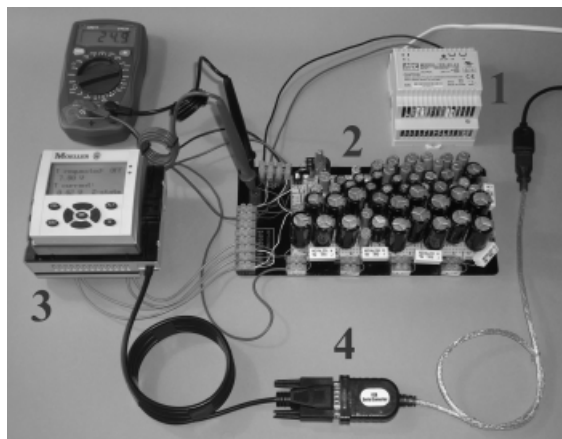
$$V = V_p - (V_p - V_U) e^{-\frac{\tau_e}{N_e}} = V_p - (V_p - V_U) e^{-\frac{\tau_e}{RC}} \quad (5)$$

gdzie: V_p - potencjał w chwili początkowej, V_U - potencjał w chwili końcowej, N - stała czasowa, R - rezystancja, C - pojemność.

Podobieństwo pomiędzy zależnościami (4) i (5) ma jedynie charakter matematyczny. Pomimo opisu odmiennych pod względem fizycznym zjawisk, możliwe jest budowanie modeli analogowych, w których temperatura odpowiada potencjałowi elektrycznemu, opór cieplny – oporowi elektrycznemu, a pojemność cieplna – pojemności elektrycznej. Podobieństwa te wykorzystano do konstrukcji stanowiska będącego tematem niniejszej pracy. Zestaw czwórników RC (typu T) został wykorzystany do symulacji pojemności cieplnych elementów konstrukcyjnych pieca oraz oporów przewodzenia i przyjmowania ciepła. Poglądowy widok idei stanowiska pokazano na rys. 4. Widok stanowiska pokazano na rys. 5.



Rys. 4. Idea stanowiska do badania regulatorów temperatury. R_α - opór przyjmowania ciepła, R_{IZ} - rezystancja proporcjonalna do oporu cieplnego izolacji, R_G - rezystancja proporcjonalna do oporu cieplnego elementu grzejnego, C - pojemności proporcjonalne do pojemności cieplnych, t_0 - temperatura otoczenia (warunek brzegowy), P_G - moc grzejna (warunek brzegowy)



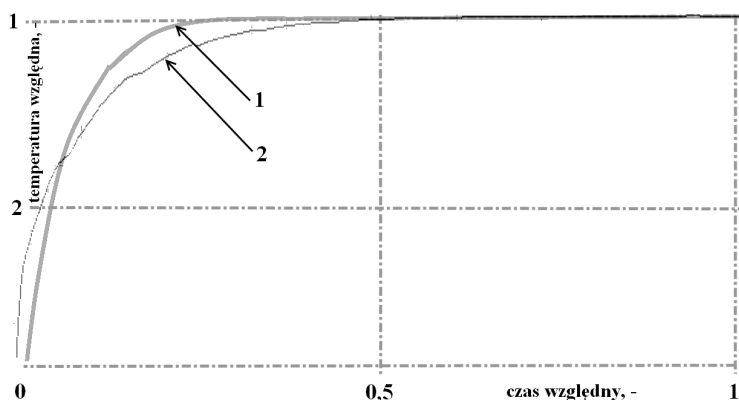
Rys. 5. Widok stanowiska pomiarowego. 1- zasilacz prądu stałego, 2- model RC, 3- Starownik PLC z zaimplementowanym oprogramowaniem zróżnicowanych regulatorów temperatury, 4- komunikacja z PC w celu archiwizacji wyników

Istotną zaletą modeli analogowych jest możliwość dowolnego doboru skali czasu symulowanych zjawisk cieplnych poprzez dobór wartości elementów RC. Zazwyczaj wykorzystywane modele charakteryzują się przebiegami przyspieszonymi w stosunku do rzeczywistych pieców. Zasadę tę wykorzystano w opracowanym stanowisku, dzięki czemu dobór nastaw regulatorów temperatury może być realizowany z istotnie większą wydajnością. Dodatkowo zaznacza się, iż opracowane stanowisko o stałych wartościach rezystancji i pojemności jest urządzeniem uniwersalnym, umożliwiającym symulacje dowolnych obiektów cieplnych (o geometrii płaskiej 2D). Odwzorowanie urządzeń o zróżnicowanych wielkościach i parametrach możliwe jest dzięki wykorzystaniu odpowiednich skal czasowych [6, 7].

3. BADANIA

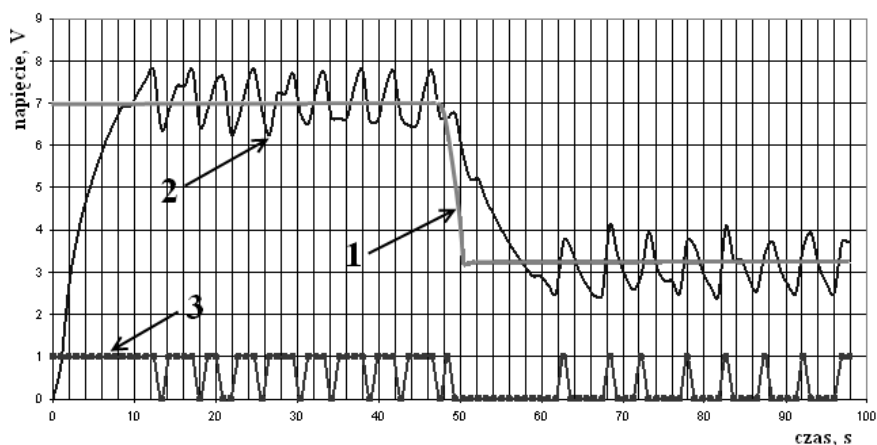
Opracowany model poddano zróżnicowanym badaniom mającym na celu weryfikację poprawności przyjętych rozwiązań oraz prezentację możliwości jego wykorzystania w procesie doboru nastaw regulatorów temperatury. W pierwszej kolejności dokonano porównania przebiegów temperatury w czasie, uzyskanych w wyniku symulacji numerycznej oraz symulacji na modelu analogowym. Wyniki, w skali względnej, pokazano na rysunku 6.

Drobne różnice pomiędzy wynikami pokazanymi na rysunku 6 wynikają z ograniczonej dokładności użytych rezystorów i kondensatorów oraz nieidealnej precyzji układu rejestracji napięcia w czasie (wartość proporcjonalna do temperatury).



Rys. 6. Przebiegi temperatur w funkcji czasu (w skali względnej), uzyskane w wyniku symulacji numerycznej (1) i analogowej (2) analogicznego obiektu elektrotermicznego

Wykonane stanowisko wykorzystano do badań zróżnicowanych regulatorów temperatury. Algorytmy regulatorów zaimplementowano w sterowniku PLC, będącym również elementem systemu rejestracji temperatury. Dobór nastaw regulatorów został dokonany przy wykorzystaniu metody Zieglera-Nicholsa oraz metody bazującej na logice rozmytej. Na rysunku 7 pokazano przykładowy przebieg napięcia (proporcjonalnego do temperatury), zarejestrowanego dla regulatora nadążnego. W tabelicy 1 zaprezentowano współczynniki charakteryzujące dokładność regulacji (czas regulacji oraz błąd w stanie ustalonym) dla różnych regulatorów w warunkach optymalnie dobranych nastaw przy wykorzystaniu dwóch metod.



Rys. 7. Przykładowy przebieg napięcia modelu RC w funkcji czasu, podczas symulacji nadążnej regulacji temperatury. 1- wartość zadana, 2- wartość rzeczywista, 3- charakterystyka mocy grzejnej

Tablica 1. Charakterystyki czasu regulacji oraz maksymalnych błędów regulacji dla zróżnicowanych regulatorów temperatury

Typ regulatora	Czas regulacji [s]	Maksymalna odchyłka w stanie ustalonym [V]
dwustawny	9.50	+0.99
P {Metoda Ziegler-Nicholsa}	44.65	-3.40
PI {Metoda Ziegler-Nicholsa}	43.70	-3.54
PID {Metoda Ziegler-Nicholsa}	8.55	-4.54
P {Metoda "logiki rozmytej"}	43.70	-3.56
PI {Metoda "logiki rozmytej"}	19.50	-3.84
PID {Metoda "logiki rozmytej"}	19.50	-3.79

Zaprezentowane wyniki badań wykazały poprawność przyjętych rozwiązań oraz wysoką dokładność funkcjonowania wykonanego modelu Beukena. W analizowanych regulatorach temperatury z wyjściem przekaźnikowym (rys. 7 oraz tablica 1), częstotliwość łączeń została ograniczona ze względu na trwałość tego elementu. Fakt ten wpłynął na uzyskane wskaźniki charakteryzujące jakość układów regulacji. W analizowanych przypadkach, najkrótszy czas regulacji uzyskano przy regulatorze PID z nastawami dobranymi przy wykorzystaniu metody Zieglera – Nicholsa. Jednak ten przypadek charakteryzował się największą odchyłką w stanie ustalonym, co nie jest zgodne z teoretycznymi charakterystykami regulatorów. Niezgodność ta wynika z charakterystyki elementu przekaźnikowego i w przypadku regulatorów z wyjściem szybkim (SSR, tyrystor i in.), nie występuje.

4. PODSUMOWANIE

W artykule omówiono podstawowe problemy dotyczące prawidłowego doboru nastaw regulatorów temperatury. Wykonane badania symulacyjne umożliwiły określenie istotnych parametrów urządzeń elektrotermicznych, wpływających na pracę systemów regulacyjnych. Oprócz parametrów konstrukcyjnych, istotna jest lokalizacja przetwornika temperatury oraz charakterystyka wyjściowa regulatora, determinujące charakterystyki czasowo – temperaturowe rejestrowane podczas pracy pieca. Zwrócono uwagę na długotrwały proces identyfikacji obiektów elektrotermicznych, umożliwiającą

optymalny dobór nastaw układów regulacyjnych. Zaproponowano konstrukcję analogowego modelu RC, umożliwiającego symulację pracy układu grzejnego oraz skrócenie czasu wymaganego do doboru nastaw regulatorów. Pewnym ograniczeniem proponowanego modelu jest stałość parametrów RC, co odpowiada obiektom liniowym, o parametrach niezależnych od temperatury roboczej. Konieczność skalowania uzyskanych nastaw celem uwzględnienia rzeczywistych parametrów konstrukcyjnych analizowanego urządzenia jest zatem możliwa jedynie przy zakładanej liniowości, co nie jest zawsze możliwe. Przewiduje się rozwinięcie proponowanej koncepcji oraz opracowanie zaawansowanego modelu umożliwiającego analizę zagadnień nieliniowych.

LITERATURA

- [1] Skoczowski S.: Technika regulacji temperatury, Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola, 2000, ISBN 8387982601.
- [2] Wesółowski M., Niedbała R., Kucharski D., Czaplicki A.: Problematyka dynamicznej regulacji temperatury w nieliniowych obiektach elektrotermicznych, Przegląd Elektrotechniczny nr 7/2011.
- [3] Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej, WPP 2006.
- [4] Kałuża G., Ładyga E.: Numerical realization of boundary element method for 1D Fourier – Kirchoff type equation, Scientific Research of the Institute of Mathematics and Computer Science, 2010, Vol. 9.
- [5] Xue D., Chen Y, Atherton D. P.: Linear Feedback Control, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007.
- [6] Ferreira A. P., Mosse D.: Thermal Faults Modeling using a RC model with an Application to Web Farms.
- [7] Skadron K., Abdelzaher T., Stan M., R.: Control – Theoretic Techniques and Thermal-RC Modeling for Accurate and Localized Dynamic Thermal Magagement, IEEE 2002.

THE WORK STAND BASING ON BEUKEN MODEL FOR TEMPERATURE CONTROLLERS TESTING

Laboratory tests of temperature control systems of electrothermal devices are, in most cases, time consuming. Such conclusion results from high values of time constants of real heating systems. Effective way of reduction of time necessary for tests, is the usage of analogue models. Such models enable for precise simulation of different electrothermal devices, in different (defined by user) time scales. In the article, utility of universal Beuken (RC) model in applications of temperature controllers tests, were presented. The work stand, basing on PLC, for determination of static and dynamic characteristics of different temperature control systems was discussed. Possibility of results comparison in real time, enable fast selection of proper control algorithm.