

JAN TARŁOWSKI

NOWA METODA POMIARU I REJESTRACJI TEMPERATURY W BADANIACH BIOLOGICZNYCH

Szczególnie szybkie w ostatnich latach tempo rozwoju nauk biologicznych nie pozwala specjalistom nawet wąskich dziedzin tych dyscyplin śledzić na bieżąco całej godnej poznania literatury światowej. Nic więc dziwnego, że wiadomości biologów w zakresie postępu technicznego w takich dziedzinach jak np. elektronika półprzewodników są najczęściej nader skromne. Dlatego wydaje się pożytecznym zwrócenie uwagi Czytelników na szeroki wachlarz możliwości, jakie daje zastosowanie w badaniach biologicznych tanich i produkowanych seryjnie w kraju termistorów oraz przedstawienie własnych wyników w jednej tylko, najczęściej spotykanej dziedzinie ich zastosowań, jaką jest rejestracja temperatury.

Odsyłając zainteresowanych do źródłowej literatury (Michalski, Eckersdorf, 1969, Schmidt, Kuźma 1972) warto we wstępie wymienić bodaj tylko te zastosowania termistorów, które mogą być pomocne w laboratoriach biologicznych. 1. Pomiar i rejestracja temperatury z dokładnością do $2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$. 2. Regulacja i kontrola temperatury z dokładnością do $2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$. 3. Bolometryczny pomiar promieniowania z dokładnością do $5 \cdot 10^{-8} \text{ W}$. 4. Pomiar i rejestracja ciśnienia gazów w zakresie od 10^{-5} do 10^1 Tr . 5. Szybki pomiar wilgotności powietrza (3 sek.). 6. Pomiar szybkości przepływu cieczy i gazów w zakresie od kilku cm do kilku m/sek. 7. Pomiar i rejestracja poziomu cieczy. 8. Precyzyjna stabilizacja i regulacja jasności oświetlenia.

Własności i rodzaje termistorów

Termistorami nazywa się półprzewodniki, których rezystancja zmienia się wraz ze zmianą temperatury w co najmniej 10 razy większym stopniu niż rezystancja metali. Wyróżniamy trzy podstawowe typy termistorów: NTC (negative temperature coefficient), których oporność maleje wraz ze wzrostem temperatury, tzn. współczynnik temperaturowy rezystancji wynosi od $-2,5$ do $-6\% / ^\circ\text{C}$, PTC (positive temperature coefficient), które w pewnym przedziale temperatur posiadają do-

datni współczynnik rezystancji i CTR (critical temperature resistor), które w pewnej krytycznej (niestety dla biologa mało ciekawej) temperaturze około 67°C wykazują skok rezystancji dochodzący do $70\%/^{\circ}\text{C}$.

Jak dotychczas najszersze zastosowanie znalazły termistory typu NTC. Stanowią one spiek tlenków metali (np. Mn, Ni i Cu) z małą domieszką innych składników uzyskiwany w temperaturze ponad 1000°C pod odpowiednim ciśnieniem i w odpowiedniej atmosferze. W wyniku skomplikowanych zabiegów technologicznych powstaje zdefektowana siatka krystaliczna różnoimiennych jonów (0^{2-}) i (Me^{+}) o wartościowości regulowanej składem jakościowym tlenków. Konduktywność tak uzyskanego spieku zależy od energii drgań cieplnych siatki krystalicznej a liczba nośników prądu rośnie wykładniczo wraz ze wzrostem temperatury.

Ostatnio w Japonii i USA używa się do produkcji termistorów monokryształów Si domieszkowanych Au a także sztucznych diamentów z domieszką B, Be lub Al. Osiągają one minimalny rozrzut parametrów co bardzo ułatwia praktyczne ich stosowanie.

Ukształtowanie termistorów, ich rozmiary i obudowa gwarantująca stałość parametrów zależą od przeznaczenia (Schmidt, Kuźma 1972). Obok termistorów masywnych o specjalnym przeznaczeniu produkowane są przede wszystkim termistory miniaturowe, gdyż jedną z podstawowych zalet tych elementów jest możliwość niemal nieograniczonej miniaturyzacji. Najbardziej rozpowszechnione są perełki o średnicy od 0,2 do 1,5 mm osadzone na drucie platynowym i zatopione w niskotopliwym szkłe ołowiowym. Celem zmniejszenia bezwładności cieplnej produkuje się termistory w kształcie nici o średnicy $30\ \mu\text{m}$ lub listków o grubości $10\ \mu\text{m}$, a w obwodach scalonych stosuje się termistory o grubości poniżej $1\ \mu\text{m}$.

W niniejszym artykule ograniczę się jedynie do krótkiego omówienia tych podstawowych właściwości termistorów, które z jednej strony decydują o ich szczególnej przydatności technicznej, a z drugiej — utrudniają lub ograniczają ich powszechne, praktyczne zastosowanie.

Szczególnie wysoki współczynnik termiczny rezystancji pozwalający wykryć, zmierzyć czy zarejestrować minimalne zmiany temperatury, miniaturowe wymiary w stosunku do innych wrażliwych na zmiany temperatury przyrządów pomiarowych, duża (rzędu $\text{k}\Omega$) rezystancja, umożliwiająca stosowanie bardzo długich przewodów łączeniowych, minimalna bezwładność i pojemność cieplna pozwalająca wykrywać źródła promieniowania cieplnego bezprzewodowo na dużą odległość i rejestrować błyskawicznie szybkie zmiany temperatury — oto najważniejsze korzystne cechy termistorów.

Podstawową wadę termistorów stanowi bardzo mała dopuszczalna wartość prądu, jaki może płynąć w układzie bez wywoływania efektu samoogrzewania. W układzie elektrycznym termistor spełnia zazwyczaj rolę opornika o stosunkowo znacznej rezystancji rzędu $\text{k}\Omega$. Po przekroczeniu progowej mocy prądu płynącego przez termistor zaczyna się on nagrzewać co z kolei wywołuje zmniejszenie jego rezystancji, a jeśli wartość rezystancji ma być miarą temperatury ośrodka to uzyskane wskazania obarczone będą błędem tym większym im większa moc będzie wydzielana na termistorze.

Cecha ta stanowiła do niedawna podstawową barierę dla powszechnego stosowania termistorów w praktyce laboratoryjnej. Istnieją dwie możliwości pokonania tej trudności. Gdy nie zależy nam na szczególnie dużej precyzji pomiaru i gdy ilość odprowadzanego ciepła wydzielanego na termistorze nie zmienia się istotnie podczas pomiaru (lub nie jest parametrem mierzonym, jak np. w pomiarach szybkości przepływu gazu lub cieczy) można zaniedbać błąd wynikający z samoogrzewania i stosować przyrządy pomiarowe nawet średniej klasy czułości. Natomiast w tych przypadkach kiedy wymagana jest duża precyzja pomiaru musimy stosować specjalne układy wzmacniające słaby prąd płynący przez termistor do wartości dających się zmierzyć lub zarejestrować. Możliwość zastosowania ogólnie dostępnych i tanich miniaturowych wzmacniaczy operacyjnych likwiduje całkowicie tę przeszkodę.

Drugą znacznie bardziej kłopotliwą wadą termistorów jest duża tolerancja wykonawcza wartości rezystancji znamionowej dochodząca nawet do 20%. Zmienność ta zmusza użytkownika do samodzielnego precyzyjnego kalibrowania całej serii zakupionych jednorazowo termistorów. Ta nieco żmudna i kłopotliwa operacja umożliwia jednak w przypadku awarii czy zniszczenia termistora szybką wymianę na inny bez obawy popełnienia błędów w pomiarach kontrolowanych przez termistor parametrów.

Ostatnią wadą termistorów, na którą należy zwrócić uwagę jest ich starzenie się. Proces naturalnego starzenia się nawet podczas pracy w warunkach i przedziale temperatur dopuszczalnych dla danego typu termistora może spowodować zmianę jego znamionowej rezystancji o 2% w ciągu roku. Jeśli jednak dysponujemy przyrządem do precyzyjnego oznaczania rezystancji znamionowej okresowo sprawdzanie przebiegu procesu starzenia się termistorów nie następuje szczególnych trudności.

Kalibracja termistorów NTC w warunkach laboratoryjnych

Jak wspomniano wyżej szczególnie duża tolerancja wykonawcza krajowych termistorów NTC zmusza użytkownika do samodzielnego zdjęcia charakterystyk całej serii zakupionych czujników termistorowych.

Wyznaczenie zależności rezystancji termistora od temperatury w całym dopuszczalnym zakresie jego pracy obejmującym zazwyczaj kilkaset °C nie jest sprawą prostą. Tylko w obrębie około 20°C powyżej i poniżej temperatury znamionowej (zwykle równej 25°C) zależność tę można opisać równaniem dającym wykres liniowy. Poza tym wąskim przedziałem w miarę oddalania się od temperatury znamionowej współczynnik temperaturowy rezystancji wzrasta (gdy T dąży do minimum) lub maleje (gdy T dąży do maksimum). Np. dla termistora o współczynniku temperaturowym rezystancji równym w temperaturze znamionowej $-4,3\%$ ($\alpha_{25^\circ\text{C}} = -4,3\%/^\circ\text{C}$) parametr ten osiąga wartości: $\alpha_{-50^\circ\text{C}} = -7\%/^\circ\text{C}$, $\alpha_{200^\circ\text{C}} = -1,3\%/^\circ\text{C}$.

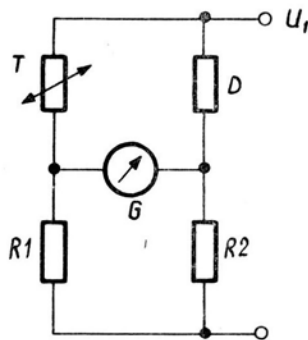
Jednakże w warunkach laboratoryjnych kalibracja termistorów z wystarczająco dużą dokładnością sprowadza się praktycznie do precyzyjnego oznaczenia rezystan-

cji dla trzech temperatur: $R_{T_{\min}}$ = rezystancji w minimalnej przewidywanej temperaturze pomiarowej, $R_{25^{\circ}\text{C}}$ = rezystancji w temperaturze znamionowej równej 25°C , $R_{T_{\max}}$ = rezystancji w maksymalnej przewidywanej temperaturze pomiarowej.

Na podstawie tych wartości wykreśla się krzywą pozwalającą w dostatecznie precyzyjny sposób odczytać wartości rezystancji każdego termistora dla dowolnego punktu w całym przedziale temperatur (od T_{\min} do T_{\max}). W tym celu na osi odciętych odkłada się odwrotności temperatur w skali Kelvina $\left(\frac{1}{T}\right)$, na osi rzędnych logarytmy naturalne rezystancji wyrażonej w Ω ($\ln R$).

Na podstawie własnych doświadczeń autor proponuje następujący zestaw pomiarowy do kalibracji termistorów:

Probówkę Hagedorna-Jensena zawierającą około 30–40 ml rtęci umocowujemy w termostacie Höplera. Temperatury (T_{\min} , T_{25} i T_{\max}) kontrolujemy przy pomocy odpowiednio dokładnego termometru zanurzonego do próbki z rtęcią. Badany termistor bagietkowy, którego perełka winna być całkowicie zanurzona w rtęci przylutowujemy do izolowanych przewodów i łączymy z mostkiem pomiarowym przedstawionym na ryc. 1.



Rys. 1. Mostek pomiarowy: U_1 — źródło prądu stałego około 30 V, T — termistor bagietkowy NTC ($\alpha_{25} = -4,3$)/ $^{\circ}\text{C}$, $R_{25^{\circ}} = 10 \Omega\text{K}$, wg danych producenta), D — opornica dekadowa o dokładności 0,1 Ω , R_1 — rezystor wysokostabilny CASE/OROF 1 M Ω 0,25 W, R_2 — rezystor CASE/OROF 10 k Ω 0,25 W, G — mikroamperomierz LM-3 „Era” 0–15 μA

Opisany układ pod warunkiem starannego dobrania wartości rezystorów R_1 i R_2 pozwala oznaczyć rezystancję znamionową dla temperatury 25°C przy mocy pomiarowej 9 μW ($P_{T=0^{\circ}\text{C}} = 27 \mu\text{W}$), co gwarantuje, że ciepło Joule’a wydzielane na termistorze podczas zdejmowania jego charakterystyki osiąga wartość całkowicie pomijalną (Schmidt, Kuźma 1972).

Podstawowe, interesujące nas własności termistorów opisuje klasyczny wzór

$$R_T = A e^{\frac{B}{T}}$$

w którym: R_T — rezystancja termistora w dowolnej temperaturze T wyrażonej w skali Kelvina, A — wielkość stała, e — podstawa logarytmów naturalnych, B — stała materiałowa.

Wyznaczenie rezystancji termistora dla dwóch możliwie odległych temperatur (T_{\min} i T_{\max}) pozwala wyznaczyć wartość stałej materiałowej B wg wzoru:

$$B = \frac{\ln R_{T_{\min}} - \ln R_{T_{\max}}}{\frac{1}{T_{\min}} - \frac{1}{T_{\max}}}$$

Znajomość stałej materiałowej pozwala precyzyjnie określić ewentualne odstępstwa od liniowego przebiegu wartości $\ln R_T = f(1/T)$, gdyż wartość B stanowi $\operatorname{tg} \beta$ gdy β jest kątem nachylenia krzywej rezystancji do osi x (wartości $1/T$). Znajomość wartości B pozwala ponadto wyznaczyć wartość współczynnika temperaturowego rezystancji α_T dla dowolnej temperatury ze wzoru:

$$\alpha_T = \frac{-B}{T^2}$$

Na podstawie omawianego wykresu można również oznaczyć wartość $\ln A$. Jest ona równa wartości rzędnej wyznaczonej przez punkt przecięcia się krzywej $\ln R(1/T)$ z osią $\ln R$.

Oznaczenie wszystkich wyżej wymienionych parametrów pozwala wybrać z całej serii termistorów takie, których wskazania podczas pracy (lub w przypadku konieczności wymiany) będą różnić się między sobą o wielkości mieszczące się w wielkości błędu pomiaru.

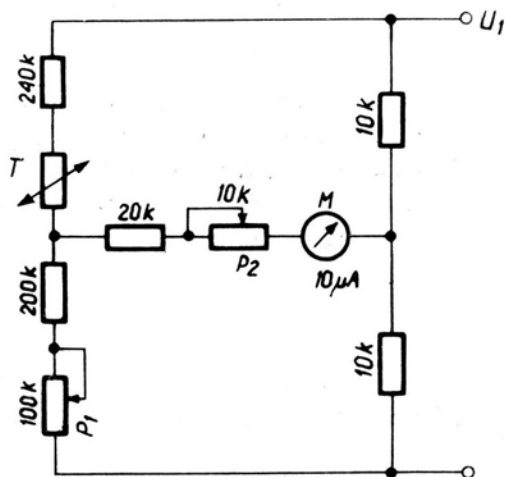
Ciągła rejestracja szybkozmiennych temperatur w badaniach fizjologicznych

W większości badań mających na celu śledzenie dynamiki procesów fizjologicznych w wielu punktach pomiarowych temperatura jest zazwyczaj tylko jednym z parametrów, które muszą być rejestrowane w sposób ciągły. Do tego celu najbardziej odpowiedni jest wielokanałowy rejestrator kompensacyjny o dużej czułości ($0 - 10 \mu\text{A}$) i szerokiej (300 mm) skali zapisu np. typu MK (produkcji NRD). Przyrząd ten posiada 6 niezależnych wejść dla sygnałów rejestrowanych parametrów. Zmiana kanałów odbywa się automatycznie z częstotliwością 2,5, 7,5, 15 lub 45 sek. Jeśli więc temperatura rejestrowana jest tylko na jednym z 6 kanałów to korzystając z największej częstotliwości zapisów otrzymamy na taśmie co 15 sek jeden barwny punkt odpowiadający aktualnej temperaturze w miejscu pomiarowym.

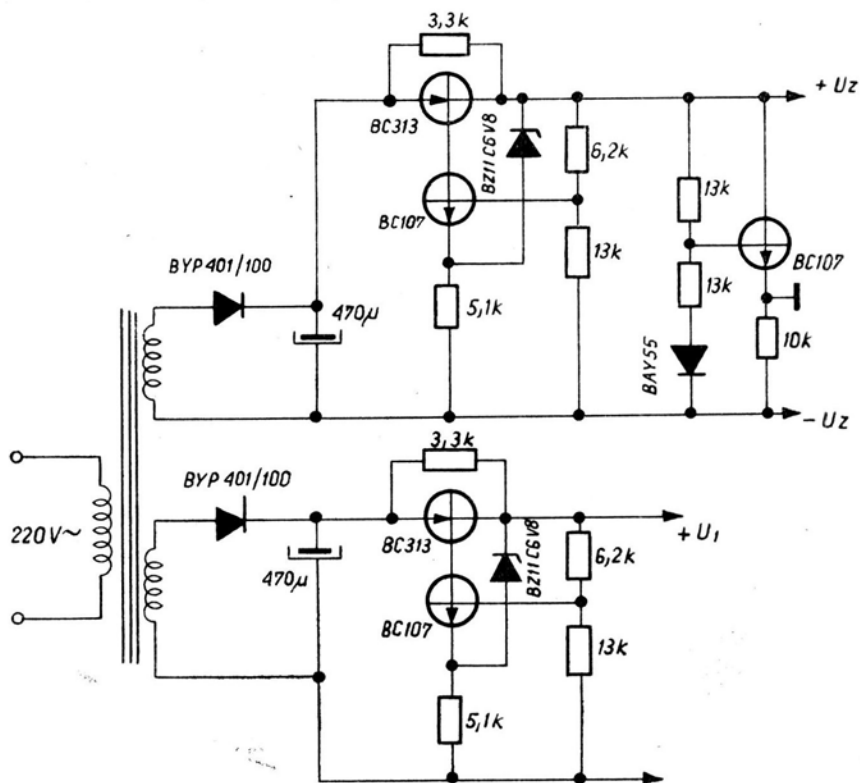
Śledzenie szybkozmiennych przebiegów temperatury w sposób ciągły wymaga zastosowania rejestratora jednokanałowego (typ MK) kreślącego szybkooschnącym tuszem nieprzerwaną krzywą. W takim przypadku dokładność zapisu (np. przy oznaczaniu potencjału wody metodą krioskopową) wiąże się z szybkością przesuwu taśmy rejestracyjnej. Podstawowa szybkość przesuwu 20 mm/h może być zwielokrotniona przy pomocy dwóch niezależnych przekładni $\times 3$ i $\times 6$ oraz $\times 10$ i $\times 100$.

Rejestracja przebiegu temperatury przy pomocy czujników termistorowych NTC współpracujących z tego typu rejestratorami nie wymaga specjalnego układu wzma-

niającego sygnał. Czujnik może być podłączony do rejestratora bezpośrednio na wyjściu najprostszego układu mostka nierównnoważonego (ryc. 2) zasilanego ze źródła prądu stałego o napięciu około 20 V (akumulatory, zasilacz stabilizowany, ogniwo suche).



Rys. 2. Mostek nierównnoważony



Rys. 3. Zasilacz

Skalowanie rejestratora w tym układzie jest nader proste. Z krzywej kalibracyjnej czujnika odczytuje się wartości rezystancji dla temperatury T_{\min} . W miejsce czujnika podłącza się opornicę dekadową ustawioną na wartość R_{\min} i potencjometr P_1 ustawia się w takim położeniu aby rejestrator wskazywał „0”. W ten sam sposób potencjometrem P_2 ustawia się wskazówkę rejestratora na wartości „100” dla wartości R_{\max} .

Omawiany mostek współpracował z 6-kanalowym rejestratorem MK i czujnikiem bagietowym o $\alpha_{25^\circ\text{C}} = -4,3\%/^\circ\text{C}$. Pozwalał rejestrować temperatury w zakresie od 10 do 30°C z dokładnością 0,05°C podczas badań wymiany gazowej roślin zbożowych przy użyciu analizatorów typu URAS i Infralit III prowadzonych od roku 1973 w Instytucie Biologii Roślin AR w Warszawie. Szczegóły dotyczące wyników pomiarów można znaleźć w corocznych sprawozdaniach z badań w ramach problemu węzłowego 09.1.7 temat 6.2.5 p.t. „Wpływ produktywności fotosyntezy na kształtowanie plonu biologicznego i rolniczego u ekstensywnych i intensywnych odmian pszenicy jarej” koordynowanego przez Instytut Ekologii PAN.

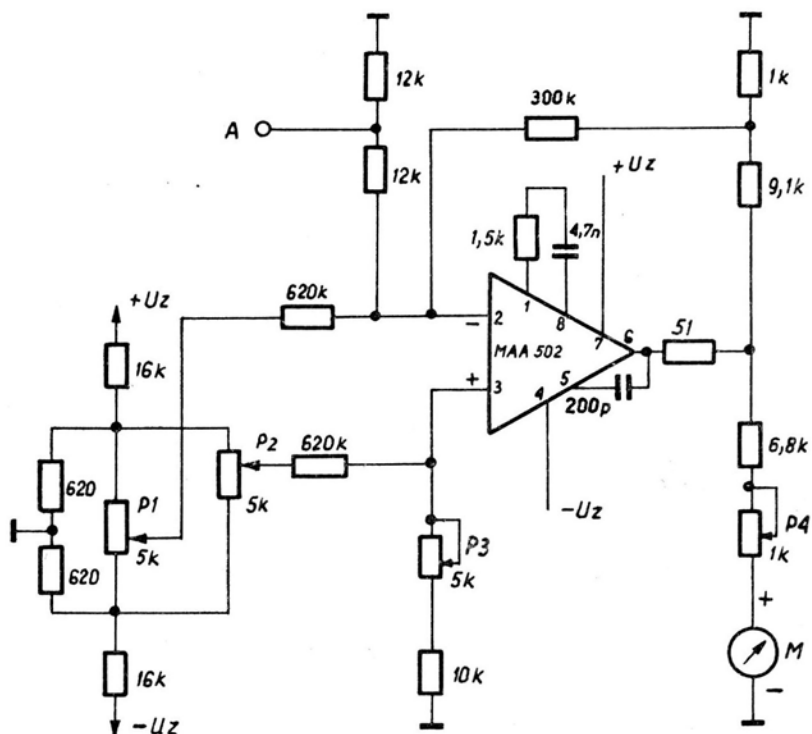
W przypadku konieczności rejestracji temperatury powietrza, pożywki, gleby, zbiornika wodnego itp. podczas wielomiesięcznych czy nawet wieloletnich obserwacji najbardziej godnym polecenia jest wielokanałowy rejestrator typu NSK (prod. KFAP) 121 ed o zakresie pomiarowym 0—1 mA. Rejestrator ten gwarantuje dokładność zapisu do 1% mierzonych wartości. Taśma rejestracyjna o szerokości roboczej 150 mm wymaga zmiany raz na miesiąc.

Ponieważ układ pomiarowy tego rejestratora jest 100 razy mniej czuły niż rejestratora kompensacyjnego musi on współpracować ze wzmacniaczem zasilanym ze źródła napięcia stałego o niezmienną się w czasie wartości napięcia znamionowego oraz stałej oporności wewnętrznej. Warunki te zapewniają: zasilacz stabilizowany (ryc. 3) oraz wzmacniacz (ryc. 4).

Obydwa układy zostały wykonane i sprawdzone przez autora. Wykonano je z elementów dostępnych na rynku krajowym. Jedyńm elementem wymagającym specjalnego wykonania jest transformator przedstawiony na ryc. 3. Winien on mieć następujące parametry: 1. Moc przenoszona ≥ 10 W, 2. dwa jednakowe, niezależne uzwojenia napięć wtórnych. Z powodu trudności warsztatowych autor zamiast jednego — zastosował dwa transformatory wyjściowe odchylenia pionowego stosowane w telewizorach produkcji krajowej (TWOP 16/40/30/666). Cały układ wykonano techniką obwodów drukowanych na płycie laminatu foliowanego miedzią.

Wzmacniacz (ryc. 4) ze względu na założoną przez autora uniwersalność zastosowania jest układem stosunkowo znacznie rozbudowanym. Potencjometry P_1 — P_4 umożliwiają kompensację niezerównoważenia napięcia, niezerównoważenia prądu oraz niewielką korekcję wzmocnienia. W okresie montowania omawianego wzmacniacza jedynie dostępnym na rynku był wzmacniacz operacyjny MAA 502. Obecnie istnieje możliwość zastosowania do omawianego celu znacznie prostszego układu w oparciu o wzmacniacz typu μA 741 lub zakupienia w KFAP wzmacniacza EV3T.

Omawiane układy okazały się niezawodne w ciągu trzyletnich doświadczeń. Między innymi stosowano je do ciągłej rejestracji temperatury i względnej wilgotności powietrza, temperatury pożywki w kulturze wodnej w wielomiesięcznych ba-



Rys. 4. Miernik ze wzmacniaczem

daniach nad dynamiką wzrostu i wymiany gazowej u sosny prowadzonych w Instytucie Przyrodniczych Podstaw Leśnictwa SGGW-AR w Warszawie. Szczegóły dotyczące wyników pomiarów można znaleźć w pracy doktorskiej R. K. Szaniawskiego 1975.

Dyskusja i wnioski

Współczesna technika pomiarowa umożliwia precyzyjny i ciągły zapis temperatury niemal w całej termodynamicznej skali Kelvina. Do tego celu wykorzystano najrozmaitsze wrażliwe na zmiany temperatury materiały. Jednakże nie wszystkie znane dziś metody mogą znaleźć zastosowanie w pracowniach biologicznych.

Najbardziej dotychczas rozpowszechnione w praktyce laboratoryjnej szklane termometry rtęciowe nie nadają się do pomiarów temperatury podczas szybkozmiennych procesów biologicznych ze względu na histerezę rozszerzalności cieplnej szkła. Przy nagłych znacznych zmianach temperatury wskazania zgodne ze skalą termometru można uzyskać bowiem dopiero po kilku godzinach (Michalski, Eckelsdorf 1969). Jednak podstawową wadą termometru cieczowego jest jego nieprzydatność do automatycznej rejestracji wskazań.

Powszechnie stosowane w przemyśle bimetalowe czujniki termoelektryczne (termopary) mają zbyt wielkie rozmiary aby można je było stosować do punktowego po-

miaru temperatury w małych obiektach. Ponadto dla uzyskania dostatecznie precyzyjnego zapisu temperatury wymagają (ze względu na niską wartość siły elektromotorycznej) zastosowania drogiej importowanych kompensatorów eliminujących pasożytnicze napięcia w obwodach pomiarowych.

Stale postępująca miniaturyzacja platynowych czujników rezystancyjnych stwarza perspektywę stosowania ich do pomiaru i ciągłej rejestracji temperatury w badaniach biologicznych. Jednak bardzo mała rezystancja czujników platynowych zmusza do stosowania celem uzyskania wymaganej dokładności pomiaru skomplikowanych i bardzo drogiej importowanych układów mostkowych oraz niezwykle czułych galwanometrów.

Warto wspomnieć, że w szczególnych wypadkach do pomiaru i rejestracji temperatury mogą być stosowane nawet podzespoły szczególnie mało wrażliwe na zmiany temperatury. Z reguły jest to aparatura bardzo skomplikowana i droga. Przykładem może służyć użyty ostatnio do rejestracji temperatury rezonator kwarcowy.

W porównaniu z wyżej wspomnianymi metoda opisana w niniejszej pracy ma zalety następujące: 1. zapewnia stosunkowo dużą precyzję i niezawodność pomiaru, 2. umożliwia maksymalną miniaturyzację czujnika i 3. wymaga najmniejszych nakładów finansowych. Dlatego wydaje się, że można ją z powodzeniem stosować we wszystkich pracowniach biologicznych, mogących korzystać z pomocy technika elektronika.

Autor wyraża serdeczne podziękowanie mgr. inż. Krzysztofowi Tarłowskiemu za okazaną pomoc w opracowaniu i uruchomieniu układów elektronicznych.

LITERATURA

- Michalski L., Eckersdorf K. 1969. *Pomiary temperatury*. W-wa, WNT.
Schmidt B., Kuźma E. 1972. *Termistory*. W-wa, PNT.
Szaniawski R. K. 1975. *Wymiana gazowa i akumulacja materii organicznej u siewek sosny zwyczajnej*. Rozprawa doktorska, AR, W-wa.