

dr inż. ANDRZEJ SYRYCZYŃSKI

Przemysłowy Instytut Automatyki  
i Pomiarów MERA-PIAP

Warszawa

## AUTOMATYZACJA SIECI CIEPŁOWNICZEJ Z ZASTOSOWANIEM MIKROPROCESORÓW

*W artykule omawia się zagadnienia sterowania siecią centralnego ogrzewania w węzłach i wymagania dotyczące regulatorów mikroprocesorowych. Przedstawia się wybrane rozwiązanie regulatora mikroprocesorowego, które wykorzystuje zasadę akumulacyjną, z symulacją procesów termicznych w modelu matematycznym budynku.*

### 1. Sterowanie węzłami sieci ciepłej

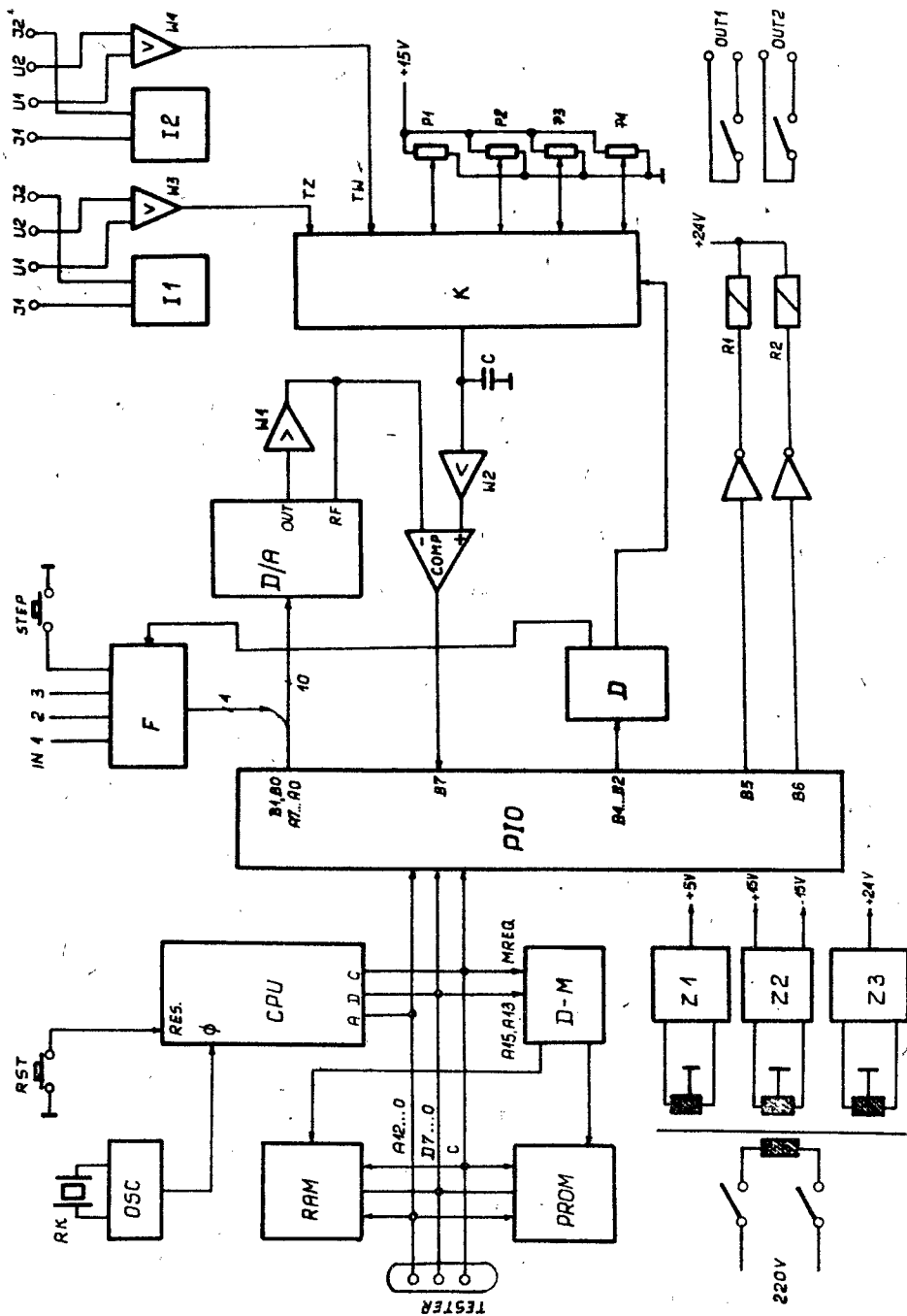
W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat powstały we wszystkich większych polskich miastach rozległe sieci ciepłownicze służące do centralnego ogrzewania i dostawy ciepłej wody, w skali wielkich osiedli, całych miast i aglomeracji. W mniejszych miejscowościach sieci są zasilane z kotłowni osiedlowych, natomiast w wielkich miastach z wielkich ciepłowni lub z systemu ciepłowni.

Głównymi i najliczniejszymi elementami sieci ciepłowniczej są węzły centralnego ogrzewania, umieszczone w ogrzewanych budynkach. Znajdują się w nich wymienniki ciepła, w których woda z sieci przekazuje ciepło do wewnętrznej instalacji centralnego ogrzewania i do instalacji ciepłej wody. Ilość ciepła potrzebna do ogrzewania budynków jest zależna od wielu czynników, głównie pogodowych, jak temperatura otoczenia, siła wiatru, nasłonecznienie. Przy braku urządzeń automatycznych w sieci sterowanie odbywa się tylko w źródłach — przez zmianę temperatury wody zasilającej sieć i natężenia przepływu.

W podstawowych obiektach sieci, jakimi są węzły centralnego ogrzewania w budynkach, dokonuje się jedynie okresowej zmiany nastaw przepływu przez personel objeżdżający kolejne węzły. Takie sterowanie nie zapewnia utrzymania stałej określonej temperatury w pomieszczeniach, jest ona różna w różnych budynkach i zmienia się wraz ze zmianą warunków pogodowych. Ponadto występują znaczne straty energii cieplnej z powodu okresowego i lokalnego przegrzewania budynków.

Tak więc automatyzacja węzłów c.o. ma duże znaczenie społeczne — zapewnia odpowiedni komfort ogrzewania, jak i ekonomiczne — oszczędza energię cieplną i jej nośniki. Zastosowane w ograniczonej skali regulatory analogowe nie odpowiadają w pełni specyfice procesu regulacji i charakterystyce zarówno sieci jak i źródeł energii. Istnieją dwie podstawowe zasady automatycznej regulacji węzłów centralnego ogrzewania.

Przy zasadzie regulacji nadążnej układ automatyki dostosowuje dostawę ciepła do chwilowego zapotrzebowania, co powinno zapewnić utrzymanie stałej temperatury wewnętrznej pomieszczeń. Regulację nadążną realizują tzw. regulatory pogodowe. Reagują one szybko na zmiany temperatury zewnętrznej, przez co powodują duże i szybkie zmiany przepływu w sieci, a w konsekwencji znaczne wahania ciśnień. Następuje często destabilizacja sieci, pogłębiana jeszcze opóźnieniami transportowymi



Schemat blokowy regulatora węzła c.o.

w rozległych sieciach. Odbija się to bardzo negatywnie na odbiornikach, szczególnie w węzłach jeszcze nie zautomatyzowanych, a także na pracy źródeł, którymi są najczęściej ciepłownie z wielkimi kotłami pyłowymi o małych możliwościach elastycznego reagowania.

Przy drugiej zasadzie — akumulacyjnej, układ automatyki w dużych przedziałach czasu koryguje różnice energii cieplnej dostarczonej do budynku i oddanej otoczeniu. Duże stałe czasu budynków, rzędu kilkudziesięciu godzin, powodują spowolnienie i spłaszczenie w czasie dynamiki poborów. Spotykane układy stosują jako sprzężenie zwrotne sygnał temperatury średniej, mierzonej w wybranych pomieszczeniach budynku. Jednakże umieszczenie czujników temperatury w lokalach mieszkalnych, a więc poza pomieszczeniem węzła cieplnego, należącego do przedsiębiorstwa ciepłowniczego, jest kłopotliwe i nie gwarantuje niezawodnej pracy układu.

## 2. Zastosowanie techniki mikroprocesorowej

Obiekty ciepłownicze charakteryzują się bardzo dużymi stałymi czasowymi, rzędu kilkudziesięciu godzin, oraz małymi wartościami przyrostów wielkości regulowanej czyli temperatury wewnętrznej, rzędu  $\pm 0,08$  K/h. Oznacza to małą przydatność standardowych regulatorów analogowych, w których nie można zrealizować potrzebnych wartości stałych czasu, a wartości pochodnej temperatur są porównywalne z błędami własnymi regulatora. Klasyczne regulatory PI lub PID nie nadają się do tych celów.

W regulatorze mikroprocesorowym nie występują ograniczenia wartości stałych czasu i nastawianych parametrów regulatora. Przez prowadzenie obliczeń z dowolnie wysoką zadaną dokładnością można sprowadzić do odpowiednio małej wartości błędy własne regulatora. Obliczanie z bardzo wysokimi dokładnościami jest możliwe w każdym mikroprocesorze, nawet w najtańszych układach 8-bitowych, jedynie przez użycie arytmetyki wielobajtowej. Czas obliczeń nie ma tu znaczenia wobec bardzo wolnozmiennego procesu.

Ta właściwość regulatorów mikroprocesorowych umożliwia symulację w regulatorze procesu termicznego budynku. Daje to również możliwość pośredniego obliczania temperatury średniej w budynku bez instalowania czujników temperatury w lokalach mieszkalnych. W takim przypadku regulator spełnia równocześnie dwie funkcje:

- symuluje dynamikę wymiany ciepła w budynku i oblicza bieżącą wartość średniej temperatury w pomieszczeniach,
- reguluje stałowartościowo średnią temperaturę w pomieszczeniach, przy czym sygnałami sprzężenia zwrotnego są obliczone w modelu symulacyjnym temperatura średnia w pomieszczeniach i jej pochodna, czyli gradient przyrostu temperatury.

Dalszą zaletą regulatora mikroprocesorowego jest możliwość stosowania różnych algorytmów sterowania, głównie w celu dopasowania regulatora do istniejącego w węzłach c.o. różnego wyposażenia w aparaturę regulacyjną. Identyczny sprzętowo, masowo produkowany regulator, tylko przez zmianę zawartości pamięci stałej może być wykorzystany w różnych układach regulacji.

## 3. Wymagania funkcjonalne dotyczące regulatora mikroprocesorowego węzła c.o.

Ze względu na swoje zadania regulator powinien składać się z mikroprocesora, pamięci danych, pamięci programu, zegara, układu wejść analogowych z komutatorem i przetwornikiem analogowo—cyfrowym, układu wyjść, bloku zadawania stałych parametrów regulacji i układu do sprawdzania pracy regulatora. Omówimy wymagania dotyczące poszczególnych układów.

W stosunku do mocy obliczeniowej mikroprocesora wymagania są bardzo małe i są spełniane przez wszystkie typy 8-bitowe. Pożądana jest minimalna liczba układów otoczenia mikroprocesora. Pod tym względem korzystny jest układ Z80, produkowany w NRD pod nazwą U880 D o minimalnym otoczeniu i wymagający jednego napięcia zasilania. Pamięć danych przechowuje małą liczbę zmiennych. Uwzględniając przedstawienie liczb w arytmetyce wielobajtowej, rząd pół kilobajta jest całkowicie wystarczający. Natomiast większe są wymagania dotyczące pojemności stałej pamięci programu. Konieczność umieszczenia arytmetyki dużej precyzji, dalej algorytmu regulatora i oprogramowania serwisowego wymaga pojemności rzędu 4 do 8 KB.

Nasuwa się kwestia wykorzystania układu mikrokomputera jednoukładowego, czy mikrokontrolera. Interesujące jest rozważenie tego problemu na przykładzie listy takich układów firmy INTEL.

W grupie układów ogólnego przeznaczenia (tańszych) typy 8020, 8021, 8022, z pojemnością wewnętrznej pamięci RAM 64 bajty i pojemnością pamięci programu, ale tylko typu ROM do 1 KB lub 2 KB (typ 8022) nie spełniają wymagań. Tym bardziej, że nie pozwalają na zewnętrzne rozszerzenie pamięci.

Z dalszej rodziny 8048 układy mające pamięć programowalną EPROM to układ 8748 z pojemnościami RAM 64 B (z rozszerzeniem do 256 B) oraz EPROM 1 KB (z rozszerzeniem do 4 KB) i układ 8749 z pojemnościami odpowiednio 128 B i 2 KB oraz identycznymi możliwościami rozszerzenia. W regulatorze węzła c.o. nie byłoby celowym ich stosowanie, gdyż wymagałyby i tak dodatkowych układów pamięci zewnętrznych, a więc nie byłby to kontroler jednoukładowy.

Dopiero w grupie mikrokontrolerów znacznie droższej rodziny 8051 znajduje się typ 8751 z pojemnością pamięci EPROM 4 KB. Natomiast moc obliczeniowa, liczba portów wejść/wyjść, układ przerwań i układ transmisji nie byłoby wykorzystane. Stąd wniosek, że specyfika omawianego zastosowania, polegająca na relatywnie dużej potrzebnej pojemności pamięci przy pozostałych wymaganiach minimalnych nie preferuje zastosowania mikrokontrolerów jednoukładowych.

Następny układ regulatora to zegar, potrzebny do zliczania okresów całkowania równań regulacji. Wobec minimalnego obciążenia obliczeniami, funkcję liczenia czasu może wykonywać mikroprocesor, jeżeli tylko zostanie wyposażony w rezonator kwarcowy.

Układ wejść analogowych: wprowadza sygnały wejściowe, którymi są, zarówno dla budynku jak i jego modelu realizowanego w regulatorze mikroprocesorowym, temperatura zewnętrzna TZ i temperatura TW zasilania wewnętrznej instalacji centralnego ogrzewania. Ponadto w przypadku pomiaru temperatury w pomieszczeniach dalszymi sygnałami wejściowymi są sygnały wejściowe temperatury z jednego lub kilku reprezentatywnych pomieszczeń. Łącznie jest to od dwóch do rzędu 6 wejść analogowych. Dokładność pomiaru, w tym przetwarzania a/c, nie musi być wysoka, wystarcza rząd 1 % co spełnia przetwornik 8-bitowy.

Regulator, poza wyżej wymienionymi wejściami pomiarowymi, powinien mieć wejścia parametrów nastawianych ręcznie przez obsługę, przy instalowaniu i do korekt eksploatacyjnych. Są one związane z obiektem i z zastosowanym układem regulacji.

Parametrami tymi są najczęściej:

- wartość zadana temperatury w pomieszczeniach,
- współczynnik skuteczności grzania,
- stała czasowa budynku,
- przesunięcie między wyjściami dwustawnymi lub długość impulsu sterującego.

Najtańszym w praktyce sposobem trwałego pamiętania tak małej liczby danych jest nastawa potencjometrami dołączonymi do wspólnego przetwornika a/c przez odrębne kanały komutatora. Dla okresowego odczytu i nastawy można zastosować urządzenie cyfrowego odczytu w postaci przenośnego miniaturowego testera. Wymagania dotyczące wyjść regulatora są związane ze stosowanymi układami regulacji węzła c.o.

Ze względu na istniejące wyposażenie różnych węzłów ciepłowniczych regulator powinien realizować dwa podstawowe warianty. Pierwszy — to klasyczny regulator trójstawny do prostych układów kaskadowych, w których obwodem wiodącym jest regulator mikroprocesorowy a obwodem podporządkowanym regulator przepływu bezpośredniego działania ze skokową, trójstawnie przełączaną wartością zadaną. Drugi wariant — to regulator impulsowy trójstawny sterujący siłownikiem elektrycznym. Ten drugi układ regulacji jest droższy, ale zapewnia ciągłą regulację. Oba warianty regulatora nie powinny się różnić sprzętowo a tylko algorytmem sterowania, czyli oprogramowaniem wewnętrznym. W obu wariantach wymagane są dwa dwustanowe wyjścia regulatora z tym że o różnym przeznaczeniu. W wariantcie pierwszym każde z wyjść steruje elektromagnesem zaworu przez czas nieograniczony. W wariantcie drugim każde z wyjść steruje impulsowo jednym kierunkiem ruchu silnika siłownika. Dodatkowym układem rozszerzającym funkcjonalność regulatora może być zespół wejść dwustanowych do skokowego przełączania wartości zadanej w pomieszczeniach za pomocą zewnętrznych sygnałów. Sygnały te mogą pochodzić z zegara programowego, z zadajnika czasowego lub z nadrzędnego układu sterowania. W tym ostatnim, perspektywicznym rozwiązaniu, będzie konieczne zainstalowanie kanałów transmisyjnych. Zdalne sterowanie posłuży do zmiany wartości zadanej temperatury w pomieszczeniach w przypadkach ograniczenia mocy dostarczanej, np. z powodu awarii części źródeł, a także w przypadku istotnej zmiany warunków pogodowych.

#### 4. Wymagania eksploatacyjne i ekonomiczne

Regulator mikroprocesorowy powinien być przystosowany do pracy w pomieszczeniu węzła sieci ciepłej, w temperaturach otoczenia  $+5$  do  $+40^{\circ}\text{C}$  i wilgotności względnej  $5 - 95\%$ . Obudowa musi spełniać wymagania ochrony przed występującymi narażeniami, w szczególności musi być zamknięta i uszczelniona oraz zabezpieczona przed dostępem osób nieuprawnionych. Do odczytu nastaw i sprawdzania pracy regulatora powinien być stosowany oddzielny, przenośny tester z odczytem cyfrowym. Koszt regulatora powinien być porównywalny z kosztem regulatorów analogowych.

#### 5. Regulator mikroprocesorowy c.o. typu ARTO

Jako przykład rozwiązania omówiony zostanie regulator ARTO, którego produkcję przygotowują obecnie zakłady MERCOMP w Szczecinie. Do jego konstrukcji przyjęto prostą i łatwo dostępną bazę elementową, a koszt konstrukcji starano się ograniczyć przez maksymalne wykorzystanie mikroprocesora zamiast odrębnych układów logicznych. Struktura i działanie regulatora zostaną omówione na podstawie schematu blokowego.

##### 5.1. Mikroprocesor i pamięci

Zastosowano najbardziej obecnie rozpowszechniony mikroprocesor 8-bitowy typu U880 D produkcji NRD (odpowiednik Z80 CPU firmy ZILOG) i komplementarny do niego układ interfejsu równoległego typu UB 855 D (odpowiednik układu Z 80 PIO). Ten układ posłużył do sprzężenia mikroprocesora ze wszystkimi układami wejściowymi i wyjściowymi.

W otoczeniu mikroprocesora znajduje się jedynie oscylator OSC z rezonatorem kwarcowym RK, konieczny do utrzymania wysokiej dokładności czasowej symulowania procesów cieplnych obiektu. W konstrukcji zapewniono możliwość użycia różnych typów układów pamięci, zależnie od wielkości oprogramowania, a także ceny i dostępności układów.

Pamięć danych RAM może składać się alternatywnie z dwóch układów typu 2114, 4-bitowych i posiada wtedy pojemność 1K bajtów lub z jednego układu typu 6116, 8-bitowego i ma wtedy pojemność 2K bajtów.

Pamięć programu może składać się z układów: 2716 – 2 egz., 2732 – 1 lub 2 egz., wreszcie 2764 – 1 egz. i może mieć pojemność 4 lub 8 KB.

## 5.2. Przetwornik analogowo-cyfrowy

W celu obniżenia kosztu regulatora zastosowano przetwarzanie obsługiwane programowo przez mikroprocesor włączony do pętli przetwornika. Mikroprocesor pełni rolę układu sterującego przetwarzaniem na zasadzie wagowej. Elementem podstawowym jest 10-bitowy przetwornik D/A cyfrowo-analogowy typu K 573PA1A produkcji ZSRR.

Wartości kodu dla kolejnych 10 porównań przygotowuje mikroprocesor i podaje do wejść przetwornika poprzez linie A0...A7 i B0, B1 układu interfejsu równoległego PIO, zaprogramowane w okresie przetwarzania jako wyjściowe.

Wzmacniacz operacyjny sumujący W1 tworzy sygnał analogowy porównywany w komparatorze COMP z sygnałem mierzonym. Dwuwartościowy sygnał wyjściowy komparatora jest odczytywany przez mikroprocesor na linii B7 układu interfejsu PIO i służy do utworzenia kodu cyfrowego następnego ważenia. Wynik przetwarzania w postaci kodu binarnego 10-bitowego jest tworzony programowo.

## 5.3. Analogowe torry pomiarowe

Regulator ma dwa rodzaje wejść analogowych. Pierwszy – to dwa wejścia termometryczne pomiaru temperatury zewnętrznej TZ i temperatury zasilania TW. Do tych wejść sygnały są podawane z czujników oporowych typu Pt 100.

Każdy z dwóch torów pomiaru temperatury jest wyposażony we wzmacniacz skalujący W3, W4 oraz źródło sygnału prądowego I1, I2 dla zasilania czujnika. Czujniki są dołączone w układzie czteroprzewodowym z wyodrębnionymi przewodami zasilania prądowego I1 – I2 oraz przewodami sygnału napięciowego U1 – U2.

Drugi rodzaj wejść analogowych to cztery wejścia parametrów obiektu, nastawiane za pomocą potencjometrów precyzyjnych wielobrotowych P1...P4.

Wspólnymi elementami dla powyższych sześciu torów analogowych są komutator K i pamięć próbkowanego sygnału analogowego zbudowana na kondensatorze C i wzmacniaczu operacyjnym W2. Komutator półprzewodnikowy K jest sterowany z dekodera kanałów D. Wyboru kanału i sterowania czasowego załączeniem kanału dokonuje mikroprocesor poprzez 3 linie B4...B2 układu interfejsu szeregowego PIO. Sterowanie realizuje zasadę próbkowania sygnału „sample and hold” w ten sposób, że przed każdym przetwarzaniem kanał komutatora zostaje dołączony do kondensatora C i wzmacniacza W2 na czas wystarczający do ustalenia się sygnału.

## 5.4. Wejścia i wyjścia dwustanowe

W regulatorze ARTO przyjęto trzy wejścia dwustanowe, dwa dla wprowadzania skokowej zmiany wartości zadanej i jedno dla wyboru wariantu aplikacyjnego.

Czwartym wejściem tego typu jest przycisk STEP wymuszający pojedynczy krok symulowania stosowany przy testowaniu regulatora. Sygnały wejściowe IN podlegają filtracji i brankowaniu sygna-

łem z dekodera D w układzie wejściowym F. Stan wejść jest odczytywany przez mikroprocesor na liniach A0...A3 układu interfejsu równoległego PIO, które na czas odczytu są programowane jako wejściowe.

Do sterowania węzła przez regulator służą dwa wyjścia dwustanowe OUT 1, OUT 2. Mogą one, zależnie od algorytmu sterowania, sterować elektromagnesy zaworów przez czas nieograniczony lub sterować dwukierunkowo siłownik elektryczny impulsami o czasie trwania do 1 minuty. Wyjścia rozwiązano na przekaźnikach elektromagnetycznych R1, R2, sterowanych z linii B5, B6 układu interfejsu PIO.

Regulator podobnie jak pozostałe elementy automatyki węzła jest zasilany z sieci 220V. Posiada wewnętrzny zasilacz tworzący stabilizowane napięcia +5V dla układów cyfrowych,  $\pm 15V$  dla układów analogowych oraz +24V niestabilizowane do zasilania przekaźników.

### 5.5. Konstrukcja regulatora

Obudowa regulatora jest wykonana jako odlew ze stopu lekkiego o zewnętrznych wymiarach – szerokość 290 mm, wysokość 145 mm, głębokość 120 mm, z uszczelnionymi drzwiczkami również w postaci odlewu o głębokości 25 mm. Obudowa jest przystosowana do montażu na ścianie, może być też zabudowana w tablicy.

Na płycie czołowej, dostępnej po otwarciu drzwi, znajdują się przełączniki wyboru pracy – ręczna, automatyczna, przyciski ręcznego sterowania, wyłącznik zasilania oraz wskaźniki świetlne pracy regulatora. Ponadto na płycie jest umieszczone gniazdo i uchwyt do dołączania i mocowania testera.

Wewnątrz obudowy znajduje się płyta z obwodami drukowanymi dwuwarstwowymi o wymiarach 260 x 120 mm, na której są montowane wszystkie elementy elektroniczne.

Przenośny tester służy do sprawdzania pracy układu regulacji i dokonywania korekt parametrów regulacji. Tester posiada wyświetlacz trzycyfrowy, siedmiosegmentowy oraz ośmiopozycyjny przełącznik do wyboru odczytywanej wielkości. Są nimi dwie mierzone temperatury, cztery nastawiane parametry oraz obliczana temperatura pomieszczeń i stan zegara programowego obliczającego krok całkowania. Wszystkie wejścia i wyjścia testera są obsługiwane przez dwa układy interfejsu równoległego Z80 PIO. Tester jest obsługiwany programowo przez mikroprocesor regulatora co 1 sekundę.

### 6. Oprogramowanie

Oprogramowanie zawarte w pamięci stałej regulatora składa się z dwóch części: pętli głównej i podprogramu arytmetycznego. Pętla główna trwa dokładnie 1 sekundę, co stanowi element naliczania okresu całkowania, który przyjęto za równy 15 minutom. W trakcie pętli głównej, poza odmierzeniem czasu, mikroprocesor wykonuje pomiar sześciu wielkości analogowych z przetwarzaniem  $a/c$ , odczytuje wejścia dwustanowe i obsługuje tester. Obsługa testera obejmuje odczyt stanu przełącznika, przeliczanie wybranej wielkości na zakres fizyczny, przetworzenie na kod dziesiętny i dalej na kod siedmiosegmentowy oraz wydanie na wyświetlacz. Obsługa ta jest przeprowadzana bez względu na dołączenie testera, by zachować stały okres pętli.

Program arytmetyczny wykonuje całkowanie równania dynamiki cieplnej budynku i algorytm regulacji. Podprogram jest uruchamiany raz na 15 minut, to jest dla każdego kroku całkowania. Podprogram wykorzystuje arytmetykę zmiennoprzecinkową o długości słowa 4 bajty, z czego 1 bajt cechy i 3 bajty mantysy.

## **7. Zakończenie**

Omawiany regulator, w wykonaniu modelu użytkowego, przeszedł długotrwałe badania eksploatacyjne w sezonach grzewczych 1985, 1986 i 1987 r. Stwierdzono, że funkcjonalność urządzenia odpowiadała założeniom, a układ pracował poprawnie przez cały czas.

Najważniejszym wynikiem było uzyskanie wysokiej jakości regulacji temperatury, co potwierdziło w praktyce zasadę wykorzystania cyfrowego modelu symulacyjnego.

Obecnie trwa przygotowanie serii prototypowej, która przejdzie pełne badania na zgodność z wymaganiami technicznymi i następnie w sezonie grzewczym 1987/88 r., będzie poddana szerokim badaniom eksploatacyjnym. Podjęcie produkcji seryjnej jest przygotowywane na przyszły rok.