

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie

Wydział Inżynierii Produkcji

Wojciech Szkolnikowski

Numer albumu 129549

Algorytmy regulacji, a właściwości obiektu i jakość sterowania

Control algorithms in connection with the process characteristic
and performance criteria

Praca magisterska

na kierunku - Zarządzanie i Inżynieria Produkcji

**Praca wykonana pod kierunkiem
prof. dr hab. inż. Andrzeja Chochowskiego
Katedra Podstaw Inżynierii**

Warszawa, 2008 rok

Oświadczenie promotora pracy

Oświadczam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis promotora pracy

Oświadczenie autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora pracy

Streszczenie

Praca niniejsza zawiera zbiór podstawowych zasad automatyki i sterowania, a więc pojęcie układu dynamicznego, jego opis matematyczny, podstawowe człony dynamiczne, kryteria stabilności oraz jakości regulacji. Przedstawiono specyfikę regulacji ciągłej, dwustawnej i trójstawnej, algorytmy regulacji PID, regulację kaskadową oraz regulację stosunku. W dalszej części opisano większość znanych i mniej znanych procedur samostrojzenia w oparciu o eksperymenty identyfikacyjne oraz kryteria jakości regulacji. Wiele uwagi poświęcono funkcjom specjalnym, wykorzystywanym w procesach automatycznej regulacji, w tym opracowane na podstawie założeń i wytycznych autora niniejszej pracy oraz zaimplementowane w regulatorze LB-600. Zaprezentowano oprogramowanie symulacyjno-konfiguracyjne regulatora LB-600 oraz oprogramowanie wizualizacyjne LBX. Przedstawiono kilka przykładów aplikacji nieprzemysłowych zrealizowanych na bazie regulatora cyfrowego LB-600. Pracę zakończono podsumowaniem i wnioskami nawiązującymi do jej tytułu.

Abstract

This paper contains a set of basic rules of automation and process control including the idea of dynamic system, its mathematical description, basic dynamic elements, stability criteria and the performance criteria. The specification of continuous regulation, on-off and three-state control, algorithms of PID control, cascade and ratio control have been presented. In the further part of this paper self adjusting procedures, those well known as well as those that are not so common, are described on the basis of identification experiments and performance criteria. A lot of attention has been paid to special functions used in automatic regulation, including those compiled by the author and implemented in the LB-600 regulator. The software of the regulator LB-600 as well as the visualizing software LBX have been presented. A few examples of non-industrial applications, realized on the basis of digital regulator LB-600, have also been shown. The paper ends with a summary and some conclusions drawn upon its title.

Key words

dynamic systems, stability criteria, process control, visualizing software

Cel i zakres pracy

Celem pracy jest przybliżenie potencjalnym użytkownikom regulatora-sterownika LB-600 produkowanego w firmie LAB-EL, niemającym codziennego kontaktu z automatyką, podstawowych zagadnień automatyki i sterowania. Przyrząd ten spełnia znakomitą funkcję dydaktyczną. Został on wykorzystany w stanowiskach badawczych w laboratoriach na trzech Wydziałach Politechniki Warszawskiej, Politechnikach Koszalińskiej, Gdańskiej, Łódzkiej, Poznańskiej, w Akademii Rolniczej w Lublinie, SGGW i paru innych. Oprócz zastosowań dydaktycznych wiele przyrządów pracuje w przemyśle hutniczym, spożywczym, szklarskim, a również w kilku aplikacjach rolniczych. Oprogramowanie przyrządu umożliwia jego szerokie wykorzystanie w sterowaniu nawet bardzo trudnymi procesami. W pracy przedstawiono algorytmy i funkcje niespotykane w innych tego rodzaju przyrządach, w tym funkcje nowatorskie opracowane i zaimplementowane przez autora pracy, który mając pełną świadomość i wiedzę odnośnie wypierania regulatorów przez systemy PLC, informuje z pełną odpowiedzialnością, że rynek dla przyrządów rodzaju regulatora-sterownika LB-600 będzie jeszcze przez wiele lat istniał. Szczególnie procesy rolnicze stanowią dziedzinę w której przyrządy autonomiczne (nie wymagające dodatkowych elementów takich jak wyświetlacze, panele dotykowe, komputery wspomagające, itp.), realizujące programy czasowe, szarżowe, tablicowe mogą mieć dużo szersze wykorzystanie. Dlatego też głównym celem pracy jest prezentacja możliwości tego przyrządu w miejscu najgodniejszym, na uczelni rolniczej, skąd studenci (sam miałem zaszczyt pomagać w organizacji ćwiczeń laboratoryjnych w oparciu o przyrząd LB-600), a za moment absolwenci, wyniosą wiedzę o możliwości zastosowania omawianego przyrządu w swoich gospodarstwach.

Spis treści

1. Wstęp	9
2. Podstawy teorii układów automatyki	12
2.1 Formy opisu dynamiki układów	14
2.2 Równania stanu	15
2.3 Równania wejście – wyjście	16
2.4 Transmitancja operatorowa	16
2.5 Charakterystyki częstotliwościowe	17
2.6 Charakterystyki czasowe	17
2.7 Podstawowe człony dynamiczne	20
2.8 Proste modele obiektów	22
2.9 Pojęcie stabilności i kryteria stabilności	24
2.10 Ocena jakości sterowania, wskaźniki jakości	26
3. Algorytmy i struktury układów regulacji (rodzaje regulacji)	30
3.1 Regulacja ciągła PID	30
3.2 Algorytm całkujący (I)	31
3.3 Algorytm różniczkowania (D)	31
3.4 Algorytm PID złożony z poszczególnych członów	32
3.5 Regulacja dwu- i trójstawną	34
3.6 Regulacja kaskadowa	39
3.7 Regulacja stosunku	41
4. Dobór nastaw regulatora – samostrojenie	42
4.1 Metoda Zieglera-Nicholsa	43
4.2 Metoda Cohena-Coona	45
4.3 Metoda Pessena	47
4.4 Metoda Hassena i Offereissena	47
4.5 Metoda identyfikacji dynamiki obiektu wg Strejca	48
4.6 Metoda identyfikacji dynamiki obiektu wg Åströma-Haglunda	50
4.7 Metoda adaptacyjnego doboru nastaw	51
4.8 Kryteria jakości regulacji	52
4.8.1 Kryterium Chiena, Hronesa i Reswicka	52
4.8.2 Inne znane i stosowane kryteria jakości regulacji	53
4.9 Podsumowanie samostrojzenia	55
5. Regulator LB-600 - funkcje specjalne	57
5.1 Funkcje specjalne	58
5.1.1 Regulacja w stanach awaryjnych – „backup”	59
5.1.2 Regulacja wyprzedzeniowa – „feedforward”	60

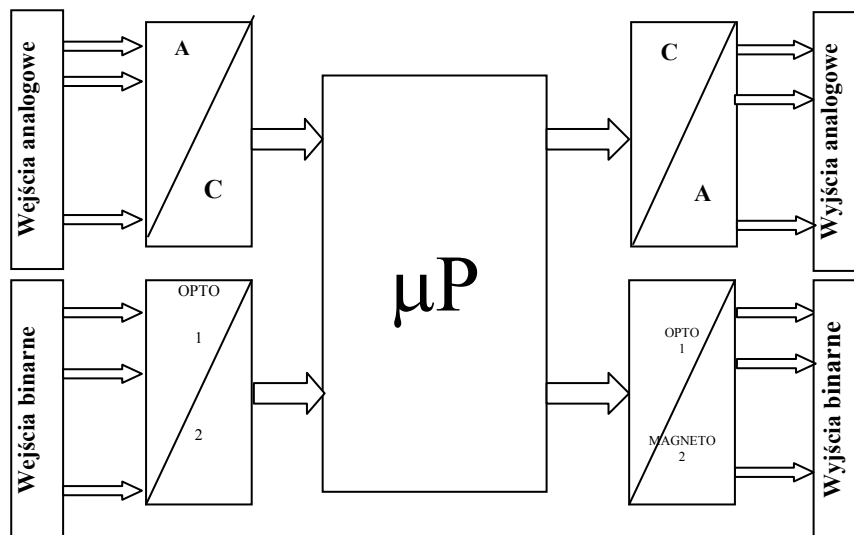
5.1.3	Regulacja predykcyjna	62
5.1.4	Regulacja PID FUZZY LOGIC	66
5.1.4.1	Wprowadzenie do logiki rozmytej Fuzzy Logic	66
5.1.4.2	Regulacja obiektów nieliniowych	70
5.1.4.3	Specyfika regulatora LB-600 w realizacji algorytmu PID FUZZY	72
5.2	Regulacja stosunku dwóch różnych wielkości	75
5.3	Regulacja nieliniowa – algorytm NL1	77
5.4	Regulacja nieliniowa – algorytm NL2	78
5.5	Regulacja przełączna	78
5.6	Regulacja pogodowo-okresowa	79
5.7	Regulacja programowa	83
5.8	Regulacje tablicowe	86
5.9	Regulacja na podstawie charakterystyk użytkownika	89
5.10	Funkcje arytmetyczne	90
5.11	Funkcje logiczne	94
5.12	Funkcje czasowe i licznikowe	95
5.13	Funkcje specjalistyczne	96
6.	Oprogramowanie symulacyjno-konfiguracyjne oraz wizualizacyjne	99
6.1	Program „Symulator-konfigurator”	101
6.2	Program „Diagram”	105
6.3	Program „Rejestr”	109
6.4	Program „LBX”	111
7.	Przykładowe aplikacje nieprzemysłowe zrealizowane przez autora z wykorzystaniem regulatora LB-600	116
7.1	Stacja pyranometryczna na terenie WIP SGGW	116
7.2	Aplikacja regulacji stosunku „gaz/powietrze”	117
7.3	Stacja hodowli roślin w Instytucie Hodowli Roślin i Nasiennictwa w Poznaniu	118
7.4	Zakład hodowli zwierząt	120
7.5	Koncepcja automatyzacji szklarni na Wydziale Ogrodniczym SGGW	122
8.	Podsumowanie i wnioski	130
	Bibliografia	132

1. Wstęp

Zagadnienia związane z problematyką regulacji i sterowania, jakie mają zastosowanie w przemyśle, gdzie wielka liczba występujących problemów stanowią płaszczyznę badawczą dla twórców aparatury i algorytmów sterowania, znajdują również wielkie zastosowania w ogólnie pojętym rolnictwie. Sterowanie mikroklimatem w halach uprawy grzybów (pieczarki, boczniaki), w pomieszczeniach hodowli drobiu, zwierząt, w szklarniach itp. stanowi bardzo ważny element jakości i wydajności, a w głębszej analizie optymalizacji kosztów poprzez większą sprawność procesów uprawowo-hodowlanych. Niezależnie jednak od rodzaju sterowanego obiektu czy procesu, opis matematyczny jego właściwości dynamicznych jest taki sam. Nie można sobie wyobrazić innego niż matematyczny sposobu opisu zjawisk fizycznych zachodzących w procesach, określenia pojęcia stabilności, algorytmów regulacji PID, samostrojenia, predykcji czy Fuzzy Logic, bez przedstawienia ich modeli matematycznych. Model matematyczny zjawiska można w sposób stosunkowo nieskomplikowany zaimplementować w komputerze czy w mikroprocesorze, na bazie którego zbudowane są wielkie i małe urządzenia cyfrowe oraz całe systemy kontrolno-pomiarowo-sterujące.

Współczesne mikroprocesory posiadają moc obliczeniową porównywalną z wielkimi „maszynami matematycznymi” stosowanymi jeszcze przed dwudziestu laty. Niewiarygodne wręcz możliwości jakie stwarza konstruktorowi współczesna elektronika głównie cyfrowa, ograniczone są jedynie jego wyobraźnią oraz umiejętnościami algorytmizacji zjawisk i zapisania ich w postaci mniej lub bardziej optymalnego programu. Obecnie produkowane mikroprocesory 16, 32 czy 64 bitowe szybko wypierają popularne 8 bitowe „pięćdziesiątki jedynki”, których możliwości osiągnęły stan nasycenia. Procesory nowych generacji osiągają znacznie krótsze czasy przetwarzania informacji (krótsze „cykle maszynowe” – jak to się dawniej mawiało).

Oprogramowanie narzędziowe do tworzenia kodów cyfrowych dla mikroprocesorów, bazują obecnie na systemach Windows lub Linux, co sam proces pisanie programów (zazwyczaj w języku C++) czyni przyjemnym i łatwym do testowania. Znaczny postęp dotyczy również pamięci półprzewodnikowych, których pojemności sięgają już gigabajtów, a czasy dostępu pojedynczych dziesiątek nanosekund. Pamięci „stałe” EPROM (zapisywane elektrycznie, a kasowane światłem UV), zastępowane są pamięciami FLASH, gdzie i zapis i kasowanie informacji odbywa się na drodze elektrycznej. Dzięki stosowaniu pamięci FLASH, eliminuje się konieczność „wyjmowania kości” EPROM w celu zmiany zapisanego w niej programu, na rzecz przeprogramowywania pamięci poprzez podłączenie urządzenia do komputera (bez konieczności demontażu urządzenia). Postęp dotyczy również przetwarzania sygnałów analogowych na cyfrowe A/C i cyfrowych na analogowe C/A. Popularność zyskują znakomite przetworniki Sigma-Delta, gdzie dokładność przetwarzania 16, 24 lub 32 bitowa, pozwala budować bardzo dokładne systemy pomiarowe. Stosowanie przetwarzania A/C na wejściu sygnałów do procesora i C/A na wyjściu z procesora pozwala zastosować optoizolację galwaniczną, co w przypadku sygnałów cyfrowych jest znacznie prostsze niż stosowanie separacji w torach analogowych.



Rys. 1.1 Schemat blokowy typowego regulatora cyfrowego

Na rys. 1.1 przedstawiono schemat blokowy podstawowego układu stosowanego we wszystkich regulatorach cyfrowych, sterownikach programowalnych i innych urządzeniach przetwarzających sygnał wejściowy analogowy po cyfrowym przetworzeniu go w systemie komputerowym – mikroprocesorowym (przetwornik analogowo-cyfrowy A/C oraz cyfrowo-analogowy C/A – przetworniki te bardzo często posiadają separację galwaniczną np. optyczną czy magnetyczną [np. przekaźniki]), na sygnał wyjściowy analogowy, przeznaczony do sterowania urządzeniami wykonawczymi (np. zawory, przepustnice, napędy, itp.).

Postęp technologiczny z jakim mamy obecnie do czynienia wymusza stosowanie pewnych standardów, również w dziedzinie sterowania i automatyzacji. Standardowe sygnały analogowe (0...20mA, 4...20mA, 1...5V, 0...10V i inne) są nadal bardzo popularne i lubiane (można je mierzyć dowolnym przyrządem pomiarowym) i sądząc po trendach rozwojowych będą stosowane nadal. Jednakże coraz większą popularność zyskują standardy tzw. inteligentne np. HART (amplituda sygnału analogowego – prądowego jest modulowana sygnałem cyfrowym przenoszącym informacje do/z konkretnego urządzenia np. przetwornika pomiarowego), standardy cyfrowe np. Fieldbus Foundation, LonWorks, CAN, PROFIBUS DP, Interbus, EIB, itp., uzupełnione sieciami Ethernet TCP/IP, co umożliwia przesyłanie danych procesowych, organizacyjnych, ekonomicznych na znaczne nieraz odległości poprzez sieci łączności komórkowej np. GPRS, Internet, itp.

Powszechnie stosowane są systemy cyfrowe przetwarzające wielkie ilości informacji analogowych i/lub cyfrowych zbieranych z obiektu i prezentowanych w sterowniach na monitorach w postaci zdynamizowanych obrazów synoptycznych poszczególnych fragmentów schematów technologicznych – od pojedynczych węzłów technologicznych po obraz całości procesu. Systemy wizualizacyjne procesów, zwane SCADA (ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*) takie jak iFix, Fix32, Intouch, WinCC, Freelance 2000, itp. współpracują z urządzeniami sterującymi (np. sterownikami PLC, regulatorami cyfrowymi, koncentratorami danych, itp.), poprzez wewnętrzne sieci cyfrowe pracujące w „czasie rzeczywistym”, gdzie

istotnym z punktu widzenia procesu jest czas przetwarzania informacji i możliwość zapisu w pamięciach znaczącej ilości informacji (np. zmiennych procesowych, itp.). Tak więc, można stwierdzić że wielkie systemy kontrolno-sterująco-wizualizacyjne dedykowane są do odbiorców obsługujących skomplikowane procesy technologiczne (zakłady petrochemiczne, elektrownie, cukrownie, itp.), gdzie liczba sygnałów mierzonych na obiekcie wynosi od kilkuset wzwyż, liczba sterowań również zawiera się w podobnych granicach, nie mówiąc o sygnałach logicznych wejściowych (przyciski, wyłączniki krańcowe, inicjatory drogowe, itp.) lub wyjściowych (alarmy, blokady, itp.).

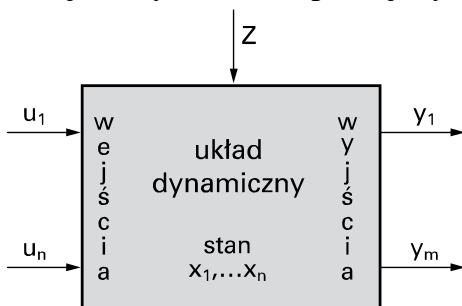
Rozwój techniki komputerowej oraz inżynierii oprogramowania pozwala realizować koncepcje automatyzacji bardzo złożonych procesów technologicznych. Pozostają jeszcze bariery w postaci różnych pod względem niezawodności struktur, rozdziału mocy obliczeniowej i kosztów złożonych systemów.

Istnieje jeszcze rynek obsługujący mniejsze obiekty, gdzie ilość sygnałów wynosi od kilku do kilkudziesięciu, gdzie wizualizacja procesu jest sprawą dodatkową, a nie podstawową, gdzie pomiary i sterowania lokalne (z miejsca na obiekcie) są ważne z punktu widzenia bezpośredniego kontaktu operatora z procesem. Rolę taką pełnią regulatory cyfrowe i małe sterowniki, które, wyposażone w programy obsługi protokołów transmisyjnych np. Modbus, Profibus DP, itp. oraz łącza RS485/422, mogą być zauważalne jako węzły technologiczne w dużych systemach cyfrowych. Tak i regulator i/lub mały sterownik obsługujący kilka obwodów regulacji np. w kotłowni lokalnej, może być widziany na ekranie synoptycznym w głównej sterowni i stamtąd może być dokonywana zmiana wartości zadanych, nastaw regulatorów PID, warunków granicznych dla stanów alarmowych, itp.

W niniejszej pracy zostaną przedstawione algorytmy regulacji w kontekście specyfiki sterowanego procesu, jakości regulacji i sterowania, łącznie z takimi, które nie są popularne, aczkolwiek niektóre procesy wymagają stosowania takich właśnie specyficznych algorytmów.

2. Podstawy teorii układów automatyki¹

Każdy układ fizyczny lub proces technologiczny można scharakteryzować pewnym zbiorem wielkości (zmiennych), które, zależnie od roli pełnionej przy opisie właściwości nazywa się **wielkościami wyjściowymi, wejściowymi** oraz **współrzędnymi stanu** (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Oznaczenia dla układu dynamicznego

Wielkości (wyjściowe) y_i , wyrażające zachowanie się procesu, można obserwować bądź zmierzyć w punktach zwanych wyjściami. Na wielkości wyjściowe można wpływać przez zmianę wielkości wejściowych u_i w punktach zwanych wejściami procesu. Współrzędne stanu x_i są najmniejszym zbiorem n zmiennych, których wartości zawierają informację o historii procesu i umożliwiają, gdy znane są wielkości wejściowe u_i , określenie przyszłego zachowania się procesu. Jeżeli wymienione wielkości są funkcjami czasu, to proces taki nazywa się **układem dynamicznym**. Liczbę n nazywa się **rzędem** układu.

Przykładem układu dynamicznego może być zbiornik cieczy z dopływami i odpływami. Jego stanem jest zapełnienie, które może być wyrażone objętością cieczy lub jej poziomem w danej chwili; wybór jednej z nich jest arbitralny, zaś wartość współrzędnej stanu (używa się też nazwy zmienna stanu) w aktualnej chwili wyraża całą „historię” wcześniejszych dopływów i odpływów. Wielkości wejściowe – te dopływy i odpływy, na które można wpływać mogą być użyte jako **wielkości sterujące procesem (sterowania)**; inne są **wielkościami zakłócającymi**. Wielkością wyjściową jest poziom cieczy. Jako wielkości wyjściowe wybiera się te, które są łatwe do pomiaru i dobrze odwzorowują stan procesu. Przyszłe zachowanie się procesu można wyznaczyć, jeśli znany jest stan w chwili początkowej $x(0)$, sterowanie $u(t)$ dla $t > 0$ oraz opis matematyczny zwany **modelem procesu** (w przypadku zbiornika – równanie bilansu dopływów i odpływów). Wszystkie wymienione wielkości mogą być wektorami o wielu współrzędnych (w zapisie używane są wtedy litery pogrubione). Można więc powyższe rozważania podsumować stwierdzeniem, że układem dynamicznym nazywamy dowolny układ fizyczny rozpatrywany z punktu widzenia jego zachowania się w czasie.

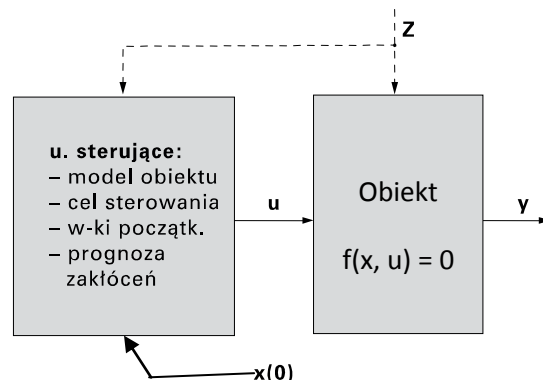
Sterowanie jest to świadome oddziaływanie na proces przez zmianę wartości wielkości wejściowych mające na celu wywołanie określonego zachowania się procesu czyli wymuszenie określonych przebiegów jego wielkości wyjściowych. Proces, na który oddziałuje się za

¹ Tekst rozdziału został zaczerpnięty z [WK1] za zgodą i przyzwoleniem dr inż.. Zygmunta Komora, współautora książki.

pomocą sterowania nazywa się też obiektem sterowanym, zaś urządzenie wyznaczające sterowanie – urządzeniem sterującym.

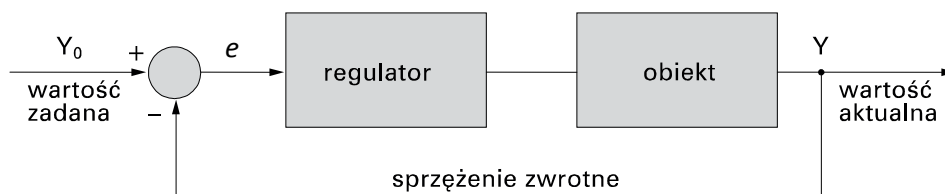
Przykładem obiektu sterowanego może być piec opalany gazem, w którym interesuje nas temperatura. Wielkościami zakłócającymi będą wahania temperatury zewnętrznej zmieniające warunki oddawania ciepła do otoczenia, lub skokowe pobory znaczących porcji energii przez wprowadzanie do pieca materiałów o niższej temperaturze. Celem sterowania będzie utrzymanie stałej wartości lub (w innym przypadku) uzyskanie odpowiedniego przebiegu temperatury we wnętrzu pieca. Cel ten można osiągnąć z określoną dokładnością przez zastosowanie urządzenia sterującego wpływającego na strumień gazu.

Można sobie wyobrazić sytuację, że przebieg sterowania wyznacza się z góry, na cały przewidywany okres działania obiektu, bez uwzględniania bieżących informacji wynikających z wartości jego wielkości wyjściowych. Nazywa się to **sterowaniem w układzie otwartym**. Jest zrozumiałe, że warunkiem uzyskania zadowalającej jakości sterowania w układzie otwartym jest pełna znajomość sposobu reagowania obiektu na sterowanie, którą podaje **adekwatny model obiektu** (np. równania różniczkowe wiążące wielkości wyjściowe z wejściowymi – $f(x, u) = 0$), a także brak zakłóceń, ewentualnie możliwość ich prognozowania – jeśli model obiektu pozwala uwzględnić je przy wyznaczaniu sterowania. Przepływ informacji w otwartym układzie sterowania ilustruje rys. 2.2.



Rys. 2.2. Sterowanie w układzie otwartym

Inna sytuacja, to korzystanie przy wyznaczaniu sterowania z bieżących informacji o procesie, zawartych w wielkościach wyjściowych; te zaś są skutkiem działania dotychczasowych sterowań i zakłóceń. Taki rodzaj sterowania nazywa się **regulacją**, a strukturę ją wyrażającą, pokazaną na rys. 2.3 - **układem sterowania ze sprzężeniem zwrotnym** lub **układem regulacji**.



Rys. 2.3. Sterowanie w układzie zamkniętym

W układzie przyczynowo-skutkowym, który można przedstawić w postaci bloków powiązanych ze sobą kanałami przepływu informacji (wyrażonymi na rysunkach strzałkami), występowanie powiązania miejsca położonego dalej w strukturze z miejscem go poprzedzającym nazywa się **sprężeniem zwrotnym** (*feedback*). Dla podkreślenia charakteru informacyjnego powiązań między elementami struktury (istnieją też np. powiązania energetyczne), w odniesieniu do wielkości wejściowej, wyjściowej i do innych wielkości w układzie dynamicznym używa się określeń **sygnał wejściowy**, **wyjściowy** itp. Dzięki sprzężeniu zwrotnemu możliwe jest wyznaczenie na bieżąco wielkości zwanej **uchybem regulacji** (dalej oznaczany literą „e” i/lub „ε”²), będącej różnicą pożądaną (zadaną) i aktualnej wartości wielkości wyjściowej. Wartość zadana (pożądana) wielkości wyjściowej kryje w sobie cel sterowania. Szczególne postaci tej wartości są źródłem nazw szczegółowych. Mówi się na przykład o regulacji stałowartościowej, programowej itp. Urządzenie sterujące (zwane w tym przypadku **regulatorem**) wyznaczające takie sterowania, które prowadzą do zmniejszenia wartości uchybu, realizuje tzw. **ujemne sprzężenie zwrotne**. Sprężenie zwrotne działające przeciwnie nazywa się sprzężeniem dodatnim. Intuicja podpowiada, a znajduje to uzasadnienie w ścisłych wywodach matematycznych, że dzięki sterowaniu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym można osiągnąć lepszą jakość sterowania w warunkach niepełnej znajomości obiektu i w obecności zakłóceń. Nie oznacza to bynajmniej, że stworzenie struktury z ujemnym sprzężeniem zwrotnym uwalnia nas od poznania procesu. Informacje zebrane podczas tzw. **identyfikacji procesu** umożliwiają dobranie właściwej struktury i parametrów regulatora. Zły dobór regulatora może przynieść skutki odwrotne do zamierzonych (np. zwiększenie wrażliwości na zakłócenia), a nawet prowadzić do niestabilności układu.

2.1 Formy opisu dynamiki układów

Przed naszkicowaniem rozmaitych form opisu dynamiki układów należy przypomnieć pojęcie liniowości.

Układ dynamiczny jest liniowy jeżeli **spełnia zasadę superpozycji**, czyli, jeżeli na pojedyncze, dowolne wymuszenia u_1 i u_2 odpowiada sygnałami y_1 oraz y_2 , to na wymuszenie będące kombinacją liniową poprzednich $c_1 u_1 + c_2 u_2$ odpowiada tą samą kombinacją liniową poprzednio uzyskanych sygnałów $c_1 y_1 + c_2 y_2$, gdzie c_1 i c_2 – dowolne stałe. Potocznie mówi się, że k-krotnie większe przyczyny wywołują k-krotnie większe skutki. W odniesieniu do układów technicznych sformułowana wyżej zasada superpozycji nie obowiązuje, dopuszcza bowiem nieograniczone wartości sygnałów, podczas gdy zawsze napotkamy na różnego rodzaju ograniczenia. Układy liniowe są łatwiejsze do analizy teoretycznej, dlatego często przyjmuje się jednak hipotezę liniowości ze świadomością konieczności pozostawiania w ograniczonym obszarze, w którym zasada superpozycji obowiązuje, np. dla niewielkich odchyśleń od punktu pracy układu. Określenie granicy obszaru pracy liniowej należy do operującego modelem układu. Orzekanie o liniowości tylko na podstawie kształtu charakterystyki

² W różnych publikacjach, na oznaczenie uchybu regulacji stosowane są symbole e lub ε.

statycznej układu – zależności między sygnałem wejściowym i wyjściowym w stanie ustalonym – może prowadzić do fałszywych wniosków, jeśli nieliniowości dotyczą wyższych pochodnych w równaniach stanu; zostanie to naświetlone niżej.

Inną ważną cechą układu dynamicznego jest **stacjonarność** (ewentualnie niestacjonarność); stacjonarność jest związana ze stałością w czasie tych parametrów konstrukcyjnych, które decydują o właściwościach dynamicznych. Niestacjonarnym będzie więc np. układ, którego wzmocnienie w interesującym przedziale czasowym zmienia się (np. pod wpływem starzenia elementów).

Możliwe do przyjęcia formy opisu dynamiki układów zależą od znajomości kinetyki zjawisk zachodzących w procesie (za przykład może tu służyć opis stanów nieustalonych napięć i prądów w obwodach RLC o stałych skupionych), od technicznych możliwości pomiarowych i czasu eksperymentów, wreszcie od potrzeb użytkownika modelu, na które składają się: dostosowana do zadania adekwatność i dokładność oraz przydatność w procedurach projektowych.

2.2 Równania stanu

Dla układu liniowego stacjonarnego n-tego rzędu o jednym wejściu u i wyjściu y równania stanu mają postać:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n + b_1u \\ &\vdots \\ \frac{dx_n}{dt} &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n + b_nu \end{aligned}$$

lub w postaci wektorowej $\frac{dx}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{bu}$: gdzie \mathbf{A} jest macierzą kwadratową $n \times n$.

Do opisu układu należy jeszcze równanie wyjścia:

$$y = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n + du,$$

lub w postaci wektorowej $y = \mathbf{cx} + du$

Elegancki i efektywny dla układów liniowych zapis nie da się uogólnić na układy nieliniowe, a i dla układów liniowych nie jest jednoznaczny, bowiem można zastosować dowolne nieosobliwe przekształcenie macierzy \mathbf{A} czyli wybrać nowe współrzędne stanu. Identyfikacja układu sprowadza się do wyznaczenia elementów macierzy \mathbf{A} , wektorów \mathbf{b} i \mathbf{c} oraz stałej d .

Przy standardowym sygnale wymuszającym funkcja $y(t)$ nosząca nazwę odpowiedzi układu na wymuszenie $u(t)$ charakteryzuje w pełni właściwości danego układu dynamicznego. Zawiera ona dwa składniki: pierwszy – niezależny od sygnału wejściowego, natomiast zależny od stanu początkowego, i wartości własnych macierzy \mathbf{A} – zwany jest często odpowiedzią

swobodną; drugi – niezależny od stanu początkowego, lecz zależny od sygnału sterującego – nazywa się odpowiedzią wymuszoną.

2.3 Równania wejście – wyjście

Jednoznaczny opis dla danego procesu podaje równanie wejście – wyjście, mające postać:

$$a_n \left(\frac{d^n y}{dt^n} \right) + a_{n-1} \left(\frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} \right) + \dots + a_1 \left(\frac{dy}{dt} \right) + a_0 y = b_m \left(\frac{d^m u}{dt^m} \right) + b_{m-1} \left(\frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} \right) + \dots + b_1 \left(\frac{du}{dt} \right) + b_0 u$$

Opis ten wynika zwykle z przesłanek fizycznych; dla układów realizowalnych fizycznie $m \leq n$. Bez utraty ogólności można przyjąć $a_n = 1$. Z równania wynika charakterystyka statyczna, będąca związkami między wejściem i wyjściem w stanie ustalonym; w omawianym przypadku uzyskuje się ją pozostawiając w zapisie tylko najniższe pochodne; a zatem

$$y = \frac{b_0}{a_0} u$$

Przykładem nieliniowości układu niedostrzegalnej na charakterystyce statycznej mógłby być iloczyn pochodnych w dowolnym składniku powyższego równania.

Równanie różniczkowe rzędu n można zawsze sprowadzić do układu n równań rzędu pierwszego, widać więc odpowiedniość obu opisów dynamiki układu.

2.4 Transmitancja operatorowa

Duże uproszczenie powyższego opisu uzyskuje się wprowadzając pojęcie transmitancji operatorowej. Jeżeli $U(s)$ jest transformatą Laplace'a sygnału wejściowego $u(t)$, a $Y(s)$ transformatą sygnału wyjściowego $y(t)$, wówczas przy zerowych warunkach początkowych równanie wejście – wyjście można zapisać w dziedzinie operatora s jako:

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) Y(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0) U(s)$$

Transmitancją operatorową nazywa się iloraz transformat sygnału wyjściowego i wejściowego przy zerowych warunkach początkowych

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Ma on postać ilorazu podanych wyżej wielomianów o współczynnikach a_j i b_j . Widać, że transformatę sygnału wyjściowego otrzymuje się przez pomnożenie transmitancji przez transformatę sygnału wejściowego. Przebieg czasowy $y(t)$ można otrzymać jako odwrotną transformatę Laplace'a:

$$y(t) = L^{-1}\{Y(s)\} = L^{-1}\{U(s)G(s)\}$$

Podstawiając w miejsce zmiennej s zmienną $j\omega$, gdzie j – jednostka urojona, zaś ω – pulsacja, otrzymuje się odpowiednio transformaty sygnałów i transmitancję widmową układu dynamicznego $G(j\omega)$.

2.5 Charakterystyki częstotliwościowe

Transmitancja widmowa jest funkcją zmiennej zespolonej. Moduł tej funkcji przy zmianie wartości ω od 0 do ∞ podaje tzw. charakterystykę częstotliwościową amplitudową układu $A(\omega) = |G(j\omega)|$, zaś argument – charakterystykę fazową $\varphi(\omega) = \arg G(j\omega)$. Używane są też charakterystyki: część rzeczywista $R(\omega) = \operatorname{Re} G(j\omega)$ i część urojona $Q(\omega) = \operatorname{Im} G(j\omega)$. Znaczenie charakterystyk częstotliwościowych wypływa też stąd, że mogą być one wyznaczone eksperymentalnie przez wprowadzenie harmonicznego sygnału wejściowego o pulsacji $\omega = 2\pi f$ (f – częstotliwość w Hz). Wynikiem pojedynczego pomiaru dla częstotliwości f_1 leżącej w paśmie przenoszenia układu jest punkt charakterystyki amplitudowej $A(\omega_1)$ – jako stosunek amplitud sygnału wyjściowego do wejściowego i punkt charakterystyki fazowej $\varphi(\omega_1)$ – jako kąt przesunięcia fazowego między tymi sygnałami.

Wśród układów dynamicznych wyróżnia się dwie klasy: układy minimalnofazowe, dla których istnieje jednoznaczny związek między charakterystykami amplitudową i fazową oraz układy nieminimalnofazowe, dla których takiego związku nie ma, a ujemne przesunięcie fazowe jest większe niż dla minimalnofazowego o identycznej charakterystyce amplitudowej.

Charakterystyki częstotliwościowe przedstawia się w różnych układach współrzędnych i skalach. Wykres $G(j\omega)$ we współrzędnych $R(\omega)$, $Q(\omega)$ nazywa się charakterystyką amplitudowo-fazową lub wykresem Nyquista.

2.6 Charakterystyki czasowe

Układ dynamiczny liniowy stacjonarny może być określony przez podanie jego odpowiedzi wymuszonych na standardowe sygnały wejściowe. Odpowiedzi te określamy mianem charakterystyk czasowych układu. Do najczęściej używanych zaliczamy charakterystykę skokową $h(t)$, tj. odpowiedź na skokową zmianę sygnału wejściowego o unormowanej amplitudzie $u(t) = I(t)$. Charakterystykę skokową można wyprowadzić na podstawie transmitancji operatorowej jako transformatę odwrotną:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} G(s) \right\}$$

Jednak największą zaletą tej formy opisu układu dynamicznego jest łatwość wyznaczenia jej najprostszymi metodami eksperymentalnymi, a także oczywista przydatność do porównań i ocen cech użytkowych układów dynamicznych.

Przykład: Zarys różnych form opisu dynamiki zostanie pokazany na przykładzie układu pierwszego rzędu z jednym wejściem i jednym wyjściem.

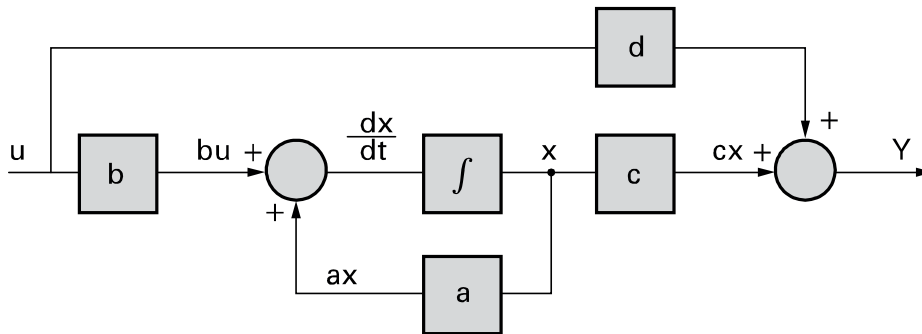
a) równanie stanu:

$$\frac{dx}{dt} = ax + bu$$

b) równanie wyjścia:

$$y = cx + du$$

Schemat blokowy ilustrujący związki między wprowadzonymi wielkościami jest pokazany na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Model równań układu dynamicznego liniowego pierwszego rzędu

Najprostszy przypadek ma miejsce dla $c = 1$ i $d = 0$. Układ charakteryzuje się jedną wartością własną $\lambda = a$.

b) równanie wejście - wyjście: $a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 = b_0 u$

lub w równoważnej postaci: $T \frac{dx}{dt} + x = bu$

Współczynnik T (w jednostkach czasu) nosi nazwę stałej czasowej układu.

W obu przypadkach, a) i b), szczegółowe rozpatrzenie dynamiki sprowadza się do rozwiązania równań, które zawiera składową swobodną zależną od współczynników równania i warunków początkowych oraz składową wymuszoną zależną od wymuszenia u .

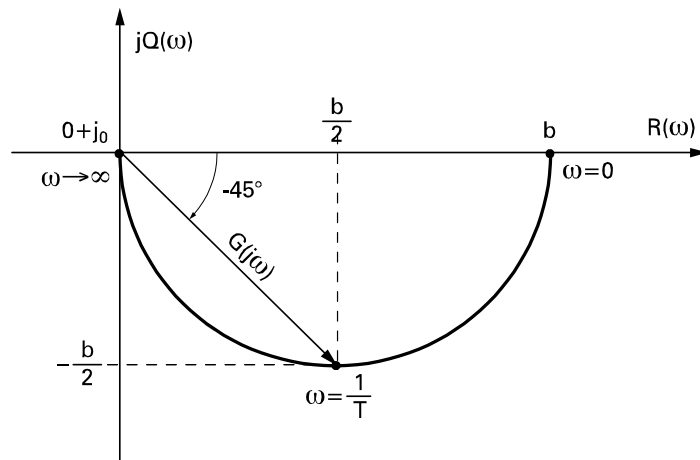
c) transmitancja operatorowa $G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b}{Ts+1}$

Dla dodatniej wartości współczynnika T układ jest stabilny i ma jeden biegun $s_1 = -\frac{1}{T}$

Transmitancja widmowa $G(j\omega) = \frac{b}{j\omega T + 1}$ ma część rzeczywistą $R(\omega) = \frac{b}{1+\omega^2 T^2}$

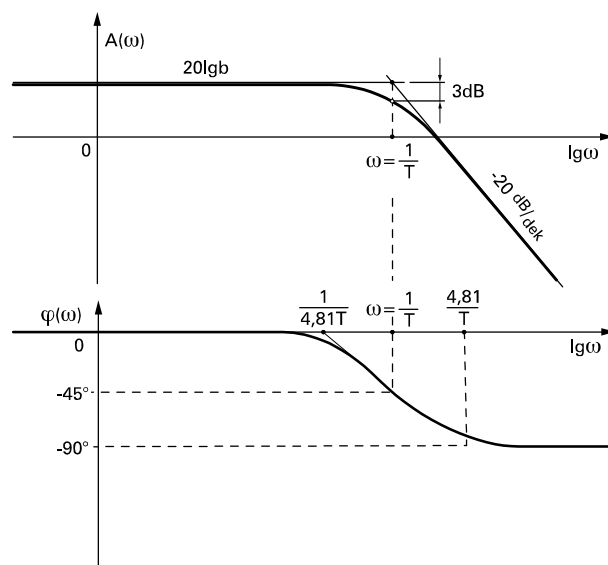
część urojoną $Q(\omega) = \frac{-b\omega T}{1+\omega^2 T^2}$, moduł $G(j\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + Q^2(\omega)}$

oraz fazę $\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{R(\omega)}$. Charakterystyka amplitudowo-fazowa (wykres Nyquista) jest pokazana na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Charakterystyka amplitudowo-fazowa (Nyquista) członu inercyjnego

- d) Charakterystyki częstotliwościowe mogą być wyznaczone eksperymentalnie lub obliczone na podstawie podanych wyżej formuł dotyczących transmitancji widmowej. Charakterystyka amplitudowa $A(\omega) = |G(j\omega)| = \frac{b}{\sqrt{1+\omega^2 T^2}}$ i również taka jak w p. c) charakterystyka fazowa $\varphi(\omega)$; są one pokazane na rys. 2.6. Korzystanie z charakterystyki asymptotycznej amplitudowej opiera się na spostrzeżeniu, że dla $\omega \ll \frac{1}{T}$ wartość $A(\omega) = b$ zaś dla $\omega \gg \frac{1}{T}$ wartość $A(\omega) = \frac{b}{\omega T}$. W punkcie $\omega = \frac{1}{T}$, w którym przecinają się asymptoty (zwanym punktem załamania charakterystyki amplitudowej) charakterystyka pokazuje wzmocnienie $A(\omega) = \frac{b}{\sqrt{2}}$ czyli mniejsze o 3 dB w porównaniu z charakterystyką asymptotyczną.

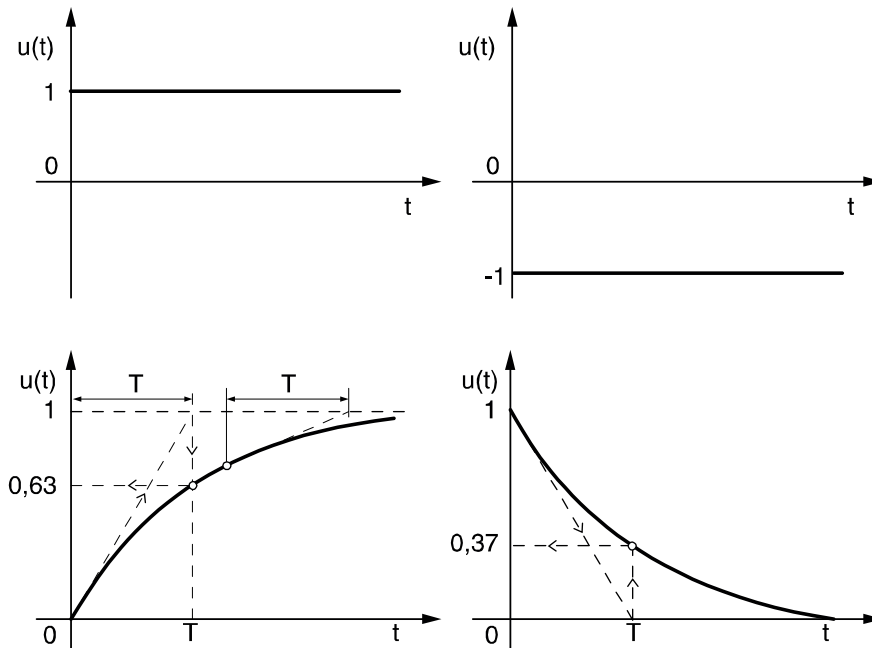


Rys. 2.6. Charakterystyka amplitudowa (a) i fazowa (b) członu inercyjnego

- e) Charakterystyka skokowa $h(t)$ omawianego dotąd układu może być wyznaczona eksperymentalnie lub obliczona na podstawie podanych wyżej opisów; ma ona postać

$$h(t) = Ub \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

gdzie U jest amplitudą skoku. Kształty przebiegów dla $b = 1$, $U = +1$ i -1 oraz sposoby graficznego wyznaczania stałej czasowej T są pokazane na rys. 2.7.



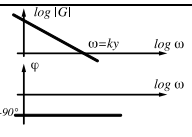
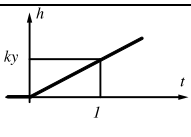
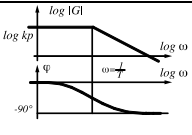
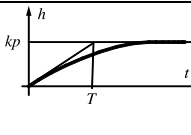
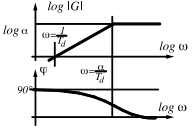
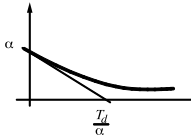
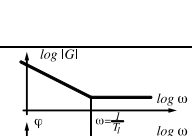
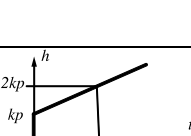
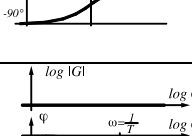
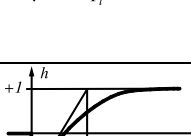
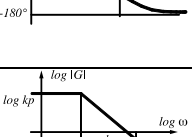
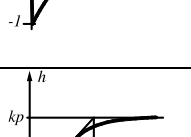
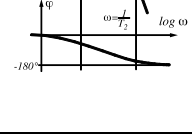

Rys. 2.7. Charakterystyka skokowa członu inercyjnego

2.7 Podstawowe człony dynamiczne

Można wyróżnić szereg układów o dość prostej dynamice, których właściwości są dokładnie zbadane. Znajomość właściwości tych typowych układów, zwanych podstawowymi członami dynamicznymi można wykorzystać przy badaniu bardziej złożonych układów. Do grupy podstawowych członów dynamicznych zaliczamy przede wszystkim układy o jednej wielkości wejściowej i jednej wyjściowej, opisane równaniami stanu liniowymi rzędu co najwyżej drugiego. Przykłady takich układów zebrano w tabelicy 2.1.

Tablica 2.1. Podstawowe człony dynamiczne

Nazwa członu	Transmitancja operatorowa	Charakterystyki częstotliwościowe	Odpowiedź skokowa	Rząd równania stanu	Wartości własne	Przykładowe równanie układu
Bezinercyjny (propor-	k_p			0	-----	$y = k_p u$

całkujący)						
Całkujący	$\frac{k_v}{s}$			1	$\lambda = 0$	$\dot{x} = u$ $y = k_v x$
Inercyjny	$\frac{k_p}{T_s + 1}$			1	$\lambda = -\frac{1}{T}$	$T\dot{x} = -x + u$ $y = k_p x$
Różniczkujący rzeczywisty	$\frac{T_d s}{T_d s + 1}$			1	$\lambda = -\frac{\alpha}{T_d}$	$T_d \dot{x} = -\alpha x + \alpha u$ $y = -\alpha x + \alpha u$
Proporcjonalno-całkujący	$k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$			1	$\lambda = 0$	$T_i \dot{x} = u$ $y = k_p x + k_p u$
Przesuwnik fazowy	$\frac{1 - Ts}{1 + Ts}$			1	$\lambda = -\frac{1}{T}$	$T\dot{x} = x + u$ $y = 2x - u$
Dwuinercyjny	$\frac{k_p}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$			2	$\lambda_1 = -\frac{1}{T_1}$ $\lambda_2 = -\frac{1}{T_2}$	$T_1 \dot{x}_1 = -x_1 + u$ $T_2 \dot{x}_2 = x_1 - x_2$ $y = k_p x_2$
Oscylacyjny	$\frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$ $0 \leq \zeta < 1$			2	$\lambda_1 = (-\zeta + j\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n$ $\lambda_2 = (-\zeta - j\sqrt{1-\zeta^2})\omega_n$	$\dot{x}_1 = \omega_n^2 x_2$ $\dot{x}_2 = -x_1 - 2\zeta\omega_n x_2 + u$ $y = kx_1$
Opóźniający	e^{-sT_0}			-----	-----	$y = u(t - T_0)$

Tablica nie wyczerpuje wszystkich przykładów członów o co najmniej dwóch współrzędnych stanu. Nie ma w niej np. członów niestabilnych. Niektóre układy zaliczane zwykle do grupy podstawowych członów dynamicznych, np. człon opóźniający, opisywany równaniem

$$y(t) = k_p u(t - T_0)$$

będący układem o parametrach rozłożonych, nie dadzą się zapisać formalizmem przestrzeni stanów, należałoby bowiem założyć nieskończoną wymiarowość wektora stanu. W tabelicy 2.1 charakterystyki częstotliwościowe amplitudowe przedstawiono w postaci przybliżonej, asymptotycznej w skali podwójnie logarytmicznej. Warto przypomnieć, że w punkcie załamania, odpowiadającym pojedynczemu biegunowi transmitancji, charakterystyka rzeczywista różni się od asymptotycznej o 3 dB. Dla układu oscylacyjnego (dwa bieguny zespolone sprzężone) w punkcie odpowiadającym pulsacji rezonansowej ω_n różnica między charakterystyką rzeczywistą i asymptotyczną zależy od współczynnika tłumienia ζ .

Tworzenie struktur złożonych z prostych członów wymaga przestrzegania reguł związanych z danym opisem. Na przykład przy szeregowym łączeniu układów ich wypadkową dynamikę można wyznaczyć przez pomnożenie transmitancji operatorowych elementów składowych lub dodanie ich logarytmicznych charakterystyk amplitudowych jeśli te elementy nie obciążają się energetycznie. W przeciwnym przypadku wyprowadzanie modelu wypadkowego, albo przeprowadzanie eksperymentów, należy wykonywać dla połączonych elementów.

2.8 Proste modele obiektów

Do analizy ilościowej układu regulacji wymagany jest dokładny model obiektu. Stworzenie pełnego opisu matematycznego jest bardzo trudne, a często nawet niemożliwe, w każdym razie kosztowne z powodu konieczności zaangażowania odpowiednich sił i środków technicznych. Powstaje wówczas problem aproksymacji obiektu, wykazującego złożone właściwości, modelami o prostej i typowej postaci. Ocena użyteczności aproksymacji należy do użytkownika.

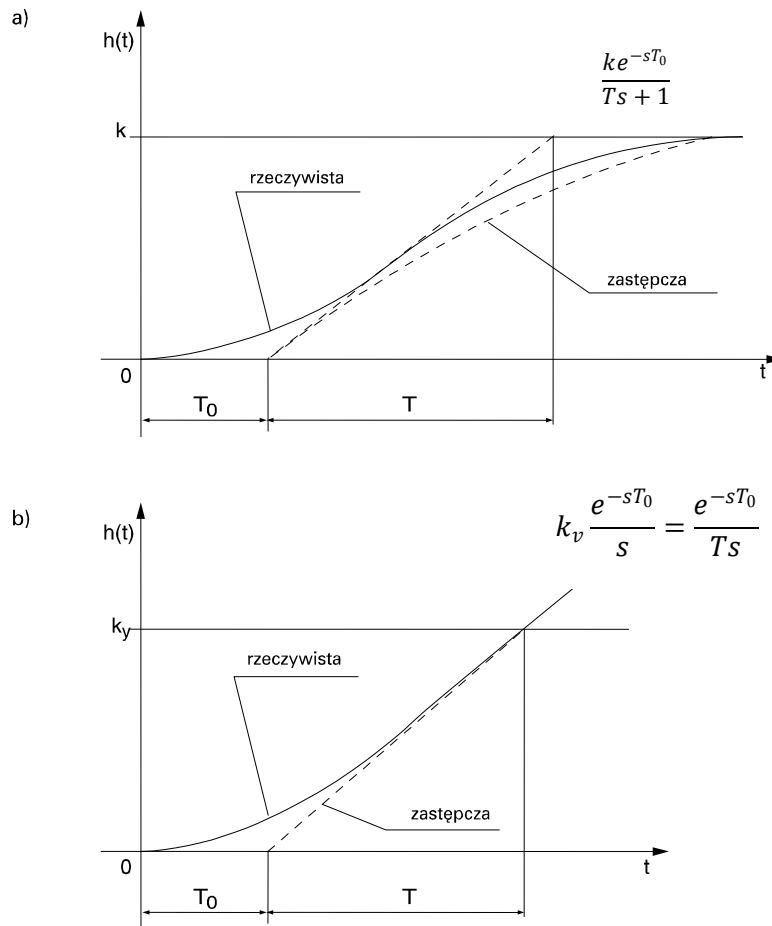
Dla obiektów z samowyrównywaniem (statycznych), tzn. takich w których odpowiedź skokowa ustala się na pewnej wartości; w wielu przypadkach wystarcza przyjąć aproksymację przez człon jednoinercyjny z opóźnieniem

$$k \frac{e^{-sT_0}}{Ts + 1}$$

Dla obiektów bez samowyrównywania (astatycznych), tzn. takich, w których nie ma wewnętrznego mechanizmu ustalania wartości odpowiedzi skokowej, przyjmuje się aproksymację członem całkującym z opóźnieniem

$$k_v \frac{e^{-sT_0}}{s}$$

Ilustracje omawianych metod w postaci typowych odpowiedzi skokowych obiektów rzeczywistych i ich aproksymacji prostymi członami są pokazane na rys. 2.8. Pokazany jest tam również sposób graficznego wyznaczania współczynników transmitancji.



Rys. 2.8. Charakterystyka skokowa obiektu statycznego (a) i astatycznego (b) oraz ich zastępcze modele (linie przerywane)

Niekiedy sygnał skokowy może być zbyt forsowny dla obiektu; stosuje się wtedy inne pobudzenia, np. impuls prostokątny, trójkątny lub trapezowy, związany z sygnałem skokowym prostą zależnością funkcyjną.

W niektórych przypadkach właściwości obiektu mogą być lepiej wyrażone innymi modelami; np. dla obiektu statycznego modelem wielobiegunowym z opóźnieniem

$$k \frac{e^{-sT_0}}{(Ts + 1)^n}$$

lub wieloinercyjnym

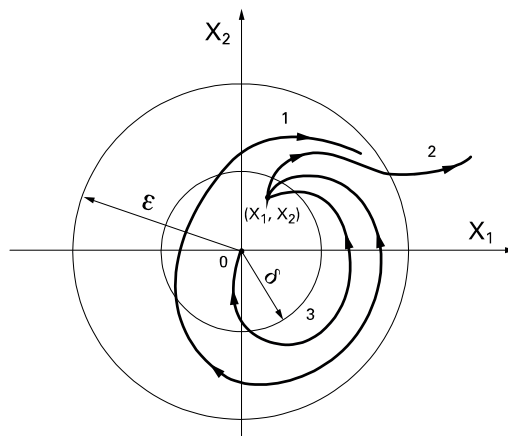
$$\frac{k}{(T_1s + 1)(T_2s + 1) \dots (T_ns + 1)}$$

Przyjęcie określonego modelu pociąga również za sobą określone skutki obliczeniowe oraz różnice w ocenie proponowanych rozwiązań systemowych.

2.9 Pojęcie stabilności i kryteria stabilności

Podstawową właściwością wymaganą od układów dynamicznych jest stabilność. Intuicyjnie, pojęcie stabilności wiąże się z pojęciem trwałej równowagi układu, przy czym można podać kilka różnych sposobów określania stabilności. Liniowy układ dynamiczny nazywamy stabilnym, jeżeli dla wszystkich ograniczonych stanów początkowych $\mathbf{x}(t_0)$ przy braku wymuszeń (zerowym sygnale wejściowym) sygnał wyjściowy pozostaje ograniczony; układ zaś nazywamy asymptotycznie stabilnym, jeżeli również przy dowolnym ograniczonym sygnale wejściowym sygnał wyjściowy pozostaje ograniczony. Układ dynamiczny jest stabilny asymptotycznie, jeżeli wszystkie jego wartości własne mają ujemne części rzeczywiste.

W ogólnym przypadku, również układów nieliniowych, powszechnie przyjmuje się ścisłą definicję stabilności punktu równowagi według Lapunowa. Rozważmy otoczenie punktu równowagi o promieniu ϵ , w którym leżą trajektorie (rys. 2.9). Jeżeli dla dowolnie małego ϵ można znaleźć takie $\delta(\epsilon)$, że trajektorie zaczynające się z warunków początkowych leżących wewnątrz obszaru o promieniu δ nie wychodzą poza ϵ - otoczenie punktu równowagi, to punkt równowagi jest stabilny. Jeśli ponadto przy czasie dążącym do nieskończoności trajektorie dążą do tego samego punktu równowagi, to punkt ten jest stabilny asymptotycznie.



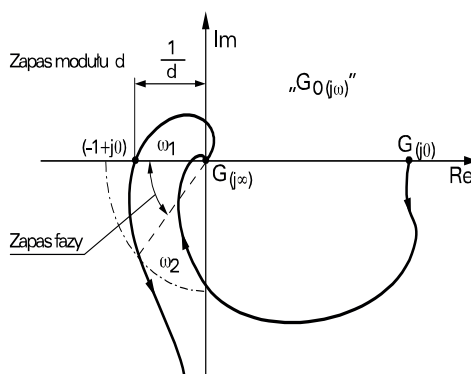
Rys. 2.9 Określenie stabilności według Lapunowa:

1 – stabilność, 2 – niestabilność, 3 - stabilność asymptotyczna

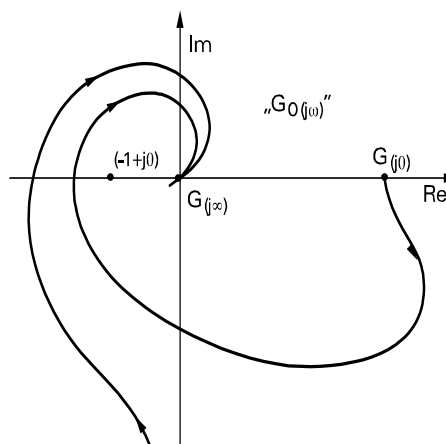
Stabilność jest podstawowym wymaganiem stawianym układom regulacji, ponieważ z jednej strony bez jej zapewnienia w ogóle nie można mówić o wymaganiach jakości, z drugiej zaś podczas prób modyfikacji parametrów układu regulacji w celu poprawy jego jakości, może dojść do przekroczenia granicy stabilności lub niebezpiecznego zbliżenia się do niej. Dlatego w tym miejscu będą nas interesować kryteria stabilności, czyli metody praktyczne, pozwalające określić na podstawie współczynników równania różniczkowego, transmitancji układu lub jego charakterystyk częstotliwościowych, czy układ jest stabilny i jakie są dopuszczalne zmiany parametrów układu stabilnego – np. wzmocnienia.

W przypadku układów technicznych, dla których łatwo jest uzyskać charakterystyki częstotliwościowe, korzysta się bardzo często z tzw. kryteriów częstotliwościowych oceny stabilności. Najczęściej stosowane kryterium Nyquista dotyczy badania stabilności układu zamkniętego na podstawie charakterystyki $G_0(j\omega)$ układu otwartego. W praktyce spotyka się najczęściej układy otwarte stabilne. Jeżeli układ otwarty nie zawierający zer transmitancji jest stabilny, to warunkiem koniecznym i dostatecznym stabilności układu zamkniętego jest, aby dla częstotliwości spełniających wzór $|G_0(j\omega)| = 1$ przesunięcie fazowe układu otwartego było większe od $-\pi$, albo inaczej – dla przesunięcia fazowego $-\pi$ wzmocnienie układu otwartego $G_0(j\omega)$ powinno być mniejsze od jedności. Charakterystyki częstotliwościowe mogą być wyznaczone eksperymentalnie lub obliczone na podstawie transmitancji. Na rys. 2.10a pokazane są charakterystyki częstotliwościowe układu otwartego, który po zamknięciu ujemnego sprzężenia zwrotnego będzie stabilny, a na rys. 2.10b układu, który po zamknięciu sprzężenia będzie niestabilny.

a)



b)



Rys. 2.10 Charakterystyki częstotliwościowe układu otwartego:

a) stabilnego po zamknięciu ujemnego sprzężenia zwrotnego, b) niestabilnego po zamknięciu ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Wprowadza się pojęcie zapasu stabilności układu (por. rys. 2.10 i 2.11). Zapasem modułu (lub amplitudy) nazywa się liczbę d taką, że

$$d|G_0(j\omega_a)| = 1$$

gdzie: ω_a , zwana częstotliwością graniczną fazy – jest częstotliwością, dla której wykres $|G_0(j\omega)|$ przecina ujemną półoś rzeczywistą. Zapasem fazy nazywa się kąt $\pi + \arg G_0(j\omega_m)$, gdzie ω_m – zwana częstotliwością graniczną modułu – jest częstotliwością, dla której $|G_0(j\omega)| = 1$.

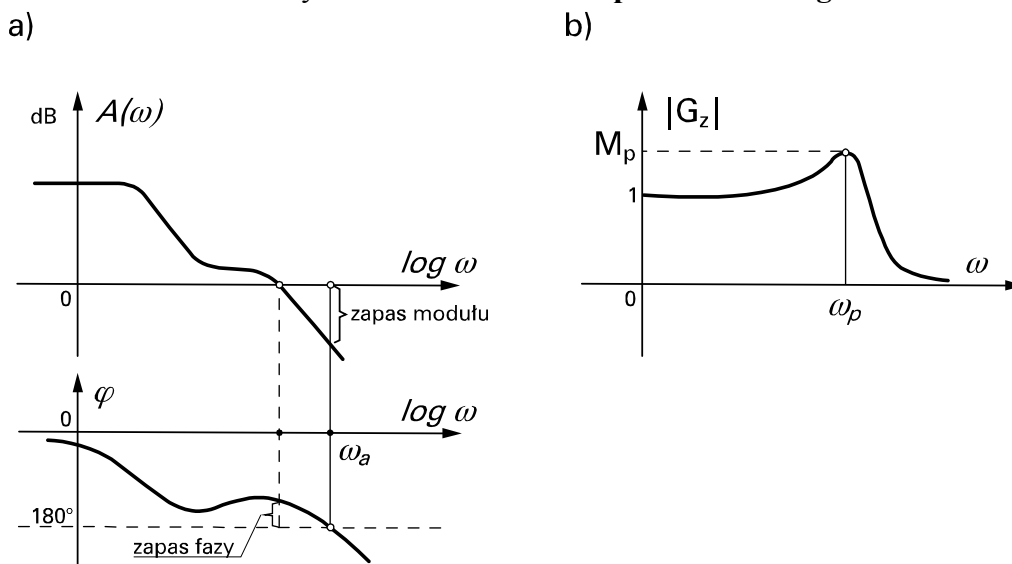
W literaturze można znaleźć omówienie innych kryteriów stabilności, odnoszących się do specyficznych form charakteryzacji układu. Na przykład kryterium Hurwitza, należące do grupy kryteriów algebraicznych, orzeka o stabilności na podstawie badania współczynników równania charakterystycznego układu.

2.10 Ocena jakości sterowania, wskaźniki jakości

Wyraźne przedstawienie jakości sterowania pozwala oceniać różne rozwiązania techniczne układów regulacji, określa miary jakości oraz przedziały ich wartości, w których cel może być uznany za zrealizowany.

Niektóre parametry charakterystyk częstotliwościowych służą do oceny jakości układów regulacji. Niewątpliwie układ o większym zapasie modułu (przy zadowalających innych cechach) jest bezpieczniejszy, dopuszcza bowiem większe zmiany wartości współczynników wzmocnień bez utraty stabilności.

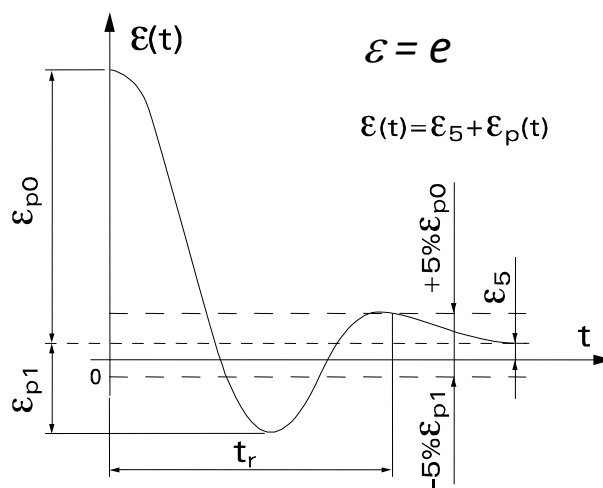
Dla układu zamkniętego definiuje się **częstotliwość rezonansową** ω_p (rys. 2.11b), dla której moduł transmitancji układu zamkniętego jest maksymalny. Częstotliwość, dla której moduł transmitancji zmniejsza się do wartości $0,707$ (-3 dB) nazywa się **częstotliwością graniczną trzy decybelową**. Różnice między podanymi częstotliwościami są zwykle niewielkie, stąd dowolna z nich może służyć do oszacowania tzw. **pasma roboczego** ω_r .



Rys. 2.11 Typowe charakterystyki częstotliwościowe układu regulacji:

- a) logarytmiczne charakterystyki układu otwartego – amplitudowa i fazowa;
 b) charakterystyka amplitudowa układu zamkniętego.

Wymienione parametry mają duże znaczenie dla projektantów układów regulacji. Zwykli użytkownicy pojęcie jakości odnoszą przede wszystkim do charakteru przebiegów uchybu regulacji $e(t)$ lub odpowiedzi $y(t)$. Jest jednak oczywiste, że poszczególne wymagania znajdują swoje odpowiedniki na innych płaszczyznach rozważań.



Rys. 2.12 Pojęcie uchybu ustalonego, przejściowego oraz czasu regulacji.

Na rys. 2.12 przedstawiony jest uchyb regulacji po skokowej zmianie sygnału zadanego. Jeśli układ jest stabilny, to w przebiegu tym da się wyodrębnić uchyb w stanie ustalonym

$$e_s = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t)$$

przy $t \rightarrow \infty$, zwany **uchybem statycznym**. Całkowity uchyb regulacji można przedstawić jako sumę dwóch składowych

$$e(t) = e_p(t) + e_s$$

gdzie składowa $e_p(t)$ nazywa się **uchybem przejściowym**. Uchyb przejściowy dąży do zera z upływem czasu. **Czas regulacji** t_r jest zazwyczaj określony jako przedział czasu od początku wymuszenia do chwili, kiedy uchyb przejściowy odpowiedzi skokowej zmniejszy się trwale poniżej 5 % swej wartości początkowej. Czas t_r jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalny do pasma częstotliwości przenoszonego przez układ.

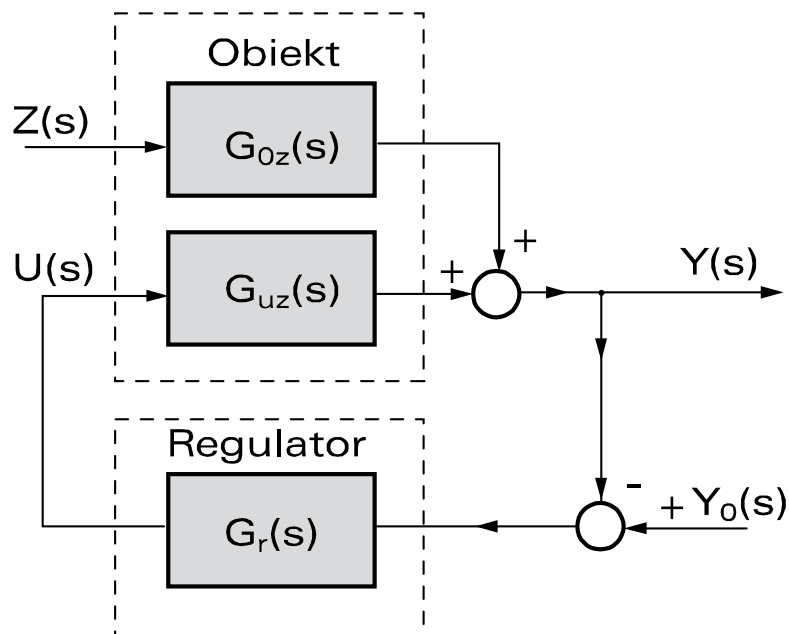
Innym wskaźnikiem jakości regulacji jest tzw. **współczynnik przeregulowania** κ , określony jako stosunek maksymalnej wartości e_{p1} uchybu przejściowego o znaku przeciwnym niż jego wartość początkowa e_{p0} – do wartości początkowej.

W celu przytoczenia pewnych relacji liczbowych przyjmijmy strukturę liniowego układu regulacji jak na rys. 2.13. Pokazano tam, że zakłócenie $Z(s)$ oddziałuje na wyjście obiektu przez transmitancję zakłóceniovą $G_{0z}(s)$, która może być równa 1, gdy rzeczywiste zakłócenie działa na wyjściu obiektu (gdy np. jakieś czynniki zakłócają pomiar wielkości wyjściowej obiektu), lub jest równa transmitancji obiektu $G_{0u}(s)$, gdy zakłócenie działa na wejściu obiektu.

W podanych niżej zależnościach istotne znaczenie ma wyrażenie

$$G_0(s) = G_r(s)G_{0u}(s)$$

odpowiadające wypadkowej transmitancji "toru głównego" regulacji, łączącego sygnały $e = y_o$ i y ; jest ona nazywana **transmitancją układu otwartego**.



Rys. 2.13 Liniowy układ regulacji

Dla struktury z rys. 2.13 definiuje się:

transmitancję układu zamkniętego (przy $Z(s) = 0$) jako

$$G(s) = \frac{Y(s)}{Y_0(s)} = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)}$$

transmitancję uchybową (przy $Z(s) = 0$) jako

$$G_e(s) = \frac{E(s)}{Y_0(s)} = \frac{1}{1 + G_0(s)}$$

transmitancję zakłócenia (przy $Y_0(s) = 0$) jako

$$G_z(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)} = \frac{G_{0z}(s)}{1 + G_0(s)}$$

Pewne różnice w metodach oceny jakości układów regulacji występują w zależności od postaci zakłóceń. Zakłócenia w przemysłowych układach regulacji mają najczęściej postać wymuszeń skokowych lub szumu o pewnej gęstości widmowej.

Układy, w których uchyb ustalony przy zakłóceniu skokowym jest równy zeru niezależnie od amplitudy wymuszenia nazywamy **układami astatycznymi**. Układy, w których uchyb ten jest różny od zera i jego wartość zależy od amplitudy wymuszenia nazywamy **układami statycznymi**. Warunkiem astatyzmu względem zakłócenia jest obecność działania całkującego w regulatorze (bieguna w zerze). Dla astatyzmu układu regulacji względem wartości zadanej y_0 jest występowanie działania całkującego w dowolnym miejscu układu – w obiekcie lub regulatorze.

W przypadku gdy ani obiekt, ani regulator nie mają właściwości całkujących, występuje uchyb ustalony o wartości:

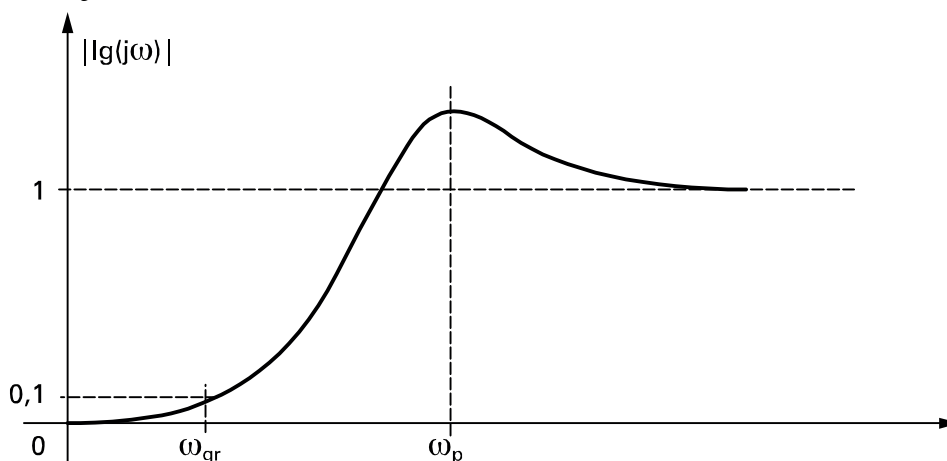
$$e = \frac{Zk_{0u}}{1 + k_{0u}k_r}$$

zwany **uchybem statycznym**. Współczynniki k_{0u} i k_r są granicami transmitancji $G_{0u}(s)$ i $G_r(s)$ przy $s \rightarrow 0$, czyli współczynnikami wzmocnienia statycznego.

Przy regulacji stałowartościowej bardzo ważny jest **częstotliwościowy wskaźnik jakości regulacji** $q(j\omega)$ definiowany jako stosunek wartości uchybu od zakłóceń w układzie z regulatorem do wartości uchybu od zakłóceń w układzie bez regulatora. Liczbowo wskaźnik ten wyraża się wzorem

$$q(j\omega) = \frac{1}{1 + G_0(j\omega)}$$

i nie zależy od miejsca doprowadzenia zakłóceń. Przebieg modułu tego wskaźnika jest pokazany na rys. 2.14. pożądane są małe wartości $|q(j\omega)|$ dla interesującego zakresu częstotliwości. Wartość $|q(j\omega)| = 0$ oznaczałaby, że regulator całkowicie kompensuje działanie zakłóceń. Na charakterystyce $q(j\omega)$ definiuje się tzw. częstotliwość graniczną ω_{gr} z warunku $|q(j\omega_{gr})| = 0,1$ oraz pasmo regulacji $0 \leq \omega \leq \omega_{gr}$. W paśmie regulacji zakłócenia są kompensowane co najmniej dziesięciokrotnie.



Rys. 2.14 Przykład częstotliwościowego wskaźnika jakości regulacji

Do oceny jakości układów regulacji stosuje się również wskaźniki całkowe, np. **całkę z kwadratu uchybu przejściowego (ISE)**.

3. Algorytmy i struktury układów regulacji (rodzaje regulacji)

W rzeczywistej strukturze układu regulacji znajdują się: obiekt regulowany, urządzenie pomiarowe (czujnik + przetwornik), urządzenie sterujące oraz urządzenie wykonawcze. Wszystkie one są elementami dynamicznymi. Jedynym elementem układu, którego właściwości dynamiczne użytkownik może świadomie kształtować i przez to wpływać na właściwości użytkowe całego układu regulacji jest regulator. W dalszej części tego opracowania będzie mowa o wielu funkcjach użytkowych regulatorów. Ich funkcją główną jest techniczna realizacja algorytmu, czyli sposobu uzależnienia sygnału sterującego $u(t)$ od uchybu $e(t)$. Regulatory nazywa się ciągłymi wówczas, gdy $u(t)$ jest sygnałem ciągłym (na przebiegu $u(t)$ nie obserwuje się skoków).

3.1 Regulacja ciągła PID

Spośród różnych algorytmów regulatorów ciągłych znalazły zastosowanie:

1. **Algorytm proporcjonalny (P)**, opisywany równaniem

$$y(t) = k_p e(t)$$

w którym k_p – wzmacnienie, a jego odwrotność wyrażona w procentach

$$X_p = \frac{1}{k_p} 100\%$$

jest zwana zakresem proporcjonalności.

Charakterystyka częstotliwościowa elementu proporcjonalnego ma stałe wzmacnienie k_p i zerowe przesunięcie fazowe.

W tabeli 3.1 przedstawiono postać czasową i operatorową algorytmu P oraz cyfrową jego interpretację zaimplementowaną w regulatorach cyfrowych.

Tabela 3.1

Postać czasowa algorytmu P	$y(t) = k_p \varepsilon(t) + P_p$ gdzie: P_p – punkt pracy regulatora P
Postać operatorowa algorytmu P	$G_p(s) = k_p$
Realizacja cyfrowa	$CV_n = k_p R \varepsilon_n$ CV – sygnał sterujący (wyjściowy z regulatora); R – kierunek działania regulatora (R = 1 praca normalna; R = -1 praca rewersyjna)

3.2 Algorytm całkujący (I), opisywany zależnością

$$y(t) = k_v \int_0^t e(\tau) d\tau + y(0)$$

w której: $k_v = 1/T_i$ – wzmacnienie wyrażone w s^{-1} lub liczbą powtórzeń na minutę (rpm), T_i – stała czasowa całkowania (czas zdwojenia) wyrażona w s, $y(0)$ – warunek początkowy; dalej będzie przyjmowane, że $y(0) = 0$.

Charakterystyka częstotliwościowa elementu całkującego ma postać $k_v / j\omega$, zatem silnie wzmacnia on sygnały o małych wartościach częstotliwości, a tłumi – o dużych; przesunięcie fazowe jest stałe i wynosi $-\pi/2$.

W tabelicy 3.2 przedstawiono postać czasową i operatorową algorytmu I oraz cyfrową jego interpretację zaimplementowaną w regulatorach cyfrowych

Tabela 3.2

Postać czasowa algorytmu I	$y(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau$
Postać operatorowa algorytmu I	$G_I(s) = \frac{1}{sT_i}$
Interpretacja cyfrowa algorytmu I	$CV_n = CV_{n-1} + R \frac{TP}{T_i} \varepsilon_n$ TP – czas próbkowania (cykl realizacji pętli programowej)

3.3 Algorytm różniczkowania (D), opisywany równaniem

$$y(t) = T_d \frac{de}{dt}$$

w którym T_d – stała czasowa różniczkowania (czas wyprzedzenia), s.

Układ realizujący ten algorytm ma charakterystykę częstotliwościową o postaci $T_d j\omega$; silnie wzmacnia sygnały o dużych częstotliwościach ω , a tłumi – o małych; przesunięcie fazowe jest stałe i wynosi $\pi/2$. W układach regulacji algorytm ten nie jest stosowany samodzielnie, bo wtedy skuteczność ujemnego sprzężenia zwrotnego malałaby w miarę zbliżania się do stanu ustalonego.

W tabelicy 3.3 przedstawiono postać czasową i operatorową algorytmu D oraz cyfrową jego interpretację zaimplementowaną w regulatorach cyfrowych

Tablica 3.3

Postać czasowa algorytmu D	$y(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$
Postać operatorowa algorytmu D	$G_{PD}(s) = sT_d$
Interpretacja cyfrowa algorytmu D	$CV_n = CV_{n-1} + R \left[\frac{T_d \alpha}{TP} (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) \right]$ <p>α – jest to współczynnik ograniczenia różniczkowania, który w wielu aplikacjach zawiera się w przedziale 0,1...0,25</p>

3.4 Algorytm PID złożony z poszczególnych członów

Wielkości k_p , T_i , T_d nazywa się **parametrami dynamicznymi regulatora** lub jego **nastawami**.

Oprócz algorytmów P lub I, charakterystycznych dla regulatorów specjalistycznych (np. bezpośredniego działania), używane są algorytmy kombinowane: PD, PI, PID, łączące pozytywne cechy poszczególnych działań. Dokładna znajomość algorytmu PID ułatwia rozpatrywanie innych kombinacji jako szczególnych przypadków. Równanie i charakterystyka częstotliwościowa układu realizującego **algorytm PID** są następujące:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

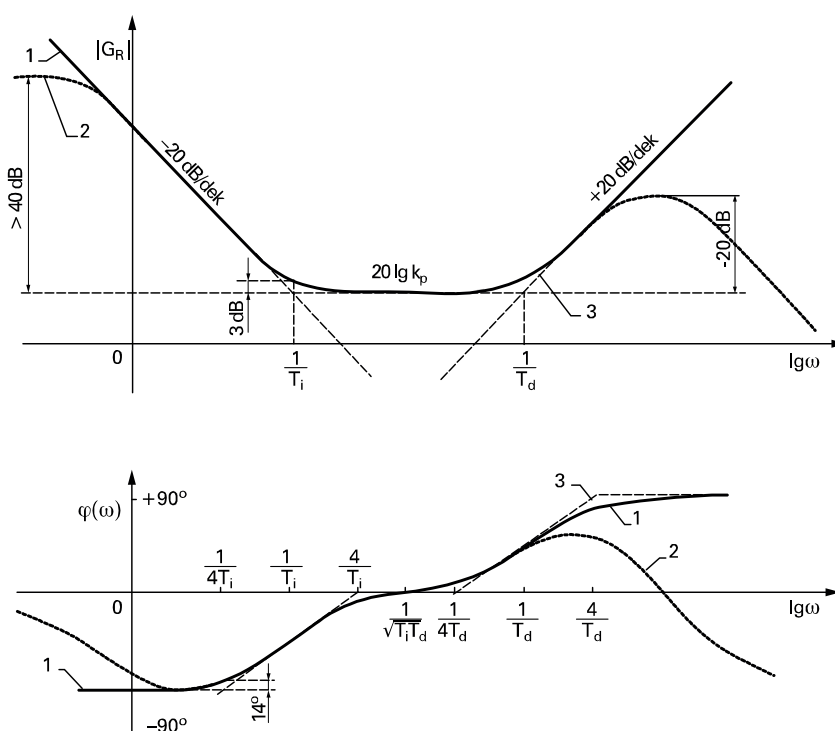
$$G_r(j\omega) = k_p \left[1 + \frac{1}{T_i(j\omega)} + T_d(j\omega) \right]$$

W tablicy 3.4 przedstawiono postać czasową i operatorową algorytmu PID oraz cyfrową jego interpretację zaimplementowaną w regulatorach cyfrowych.

Tablica 3.4

Postać czasowa algorytmu PID	$y(t) = k_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right]$
Postać operatorowa algorytmu PID	$G_{PID}(s) = \frac{Y(s)}{PV(s) - SP(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_d \alpha s + 1} \right)$ <p>$\alpha = 0,1...0,25$ (ograniczenie różniczkowania) –typowo $\alpha = 0,125$</p>
Interpretacja cyfrowa algorytmu PID	$CV_n = CV_{n-1} + k_p R \left[(\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) + \frac{TP}{T_i} \varepsilon_n + \frac{T_d \alpha}{TP} (\varepsilon_n - 2\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_{n-2}) \right]$

Wykresy charakterystyk amplitudowej i fazowej regulatora PID pokazano na rys. 3.1. Gdy przyjmuje się stałą $T_d = 0$, wówczas otrzymuje się strukturę regulatora PI, a gdy przyjmuje się dużą wartość stałej T_i – strukturę PD. Zmiana wzmocnienia k_p powoduje przesunięcie równoległe, w kierunku pionowym całej charakterystyki amplitudowej, nie wpływa natomiast na charakterystykę fazową. Przyjmując różne wartości nastaw regulatora k_p , T_i , T_d , uzyskuje się różne kształty charakterystyk. O doborze nastaw będzie mowa w dalszej części niniejszego opracowania.



Rys. 3.1 Charakterystyki częstotliwościowe regulatora PID:
1 – idealna; 2 – rzeczywista; 3 – asymptotyczna

Należy zwrócić uwagę, że zarówno w zakresie małych jak i dużych częstotliwości charakterystyki rzeczywistych regulatorów PID odbiegają od idealnych i ma to głębokie uzasadnienie fizyczne. Abstrahując od tego, że należy wtedy przyjmować inne modele matematyczne regulatorów, to trzeba się liczyć z ograniczonym wzmocnieniem na krańcach pasma roboczego regulatora oraz z ograniczeniem możliwości korekcyjnych w zakresie dużych częstotliwości, ponieważ dodatkowo przesunięcie fazy nie jest tak duże jak można by sobie życzyć.

Do problemów z różnymi modelami matematycznymi regulatora trzeba jeszcze dodać te, które wynikają z cyfrowej realizacji urządzenia. Wcześniej ta sprawa nie była sygnalizowana, ale jest oczywiste, że z konieczności dyskretyzacji sygnałów i wykonywania na nich operacji zastępujących sumowanie (całkowanie) i różniczkowanie względem czasu, a także z wykonywania wszelkich obliczeń z określonym cyklem – muszą wynikać skutki obserwowane w ekstremalnych warunkach pracy. Szczegółowo rozważają to konstruktorzy aparatury; na przykład w opracowaniu [17] przytoczona jest argumentacja dotycząca wyboru okresu próbkowania cyfrowej implementacji algorytmu PID – powinien on być zarty w przedziale

$0.001 \div 0,5 T$, gdzie T jest zastępczą stałą czasową inercji obiektu. W dalszej części tego opracowania nie będziemy się zajmowali problemami konstrukcyjnymi uznając, że aparat przyjmujący i wysyłający sygnały analogowe może być przez użytkownika traktowany jako analogowy, mimo iż jest w istocie urządzeniem cyfrowym.

Oprócz funkcji technicznej realizacji algorytmu regulator uniwersalny – tzn. taki, który na wejściu i wyjściu operuje sygnałami standardowymi oraz może mieć zmieniane nastawy w szerokim zakresie – powinien mieć m.in. następujące cechy:

- ◆ możliwość nastawiania w aparacie, lub przyjmowania z zewnątrz, oraz wskazywania aktualnej wartości zadanej,
- ◆ wskazywania wartości uchybu e oraz sygnału sterującego u ,
- ◆ możliwość bezzakłóceniewej zmiany trybu pracy Automatycznej na Ręczną,
- ◆ możliwość przyjmowania, przetwarzania i wysyłania pewnej ilości sygnałów dyskretnych,
- ◆ określonego zachowania się układu w razie wystąpienia awarii zasilania,
- ◆ możliwość współpracy z innymi urządzeniami systemu za pomocą odpowiedniego kanału transmisji.

Ponieważ aparaty wykazujące na zewnątrz cechy urządzeń analogowych są w rzeczywistości urządzeniami cyfrowymi, ważnym parametrem jest czas obiegu pętli programowej realizowanej przez układ mikroprocesorowy.

Omówiony dotąd algorytm PID można nazwać standardowym, dostosowanym do typowych obiektów przemysłowych. Opracowano też szereg modyfikacji wzbogacających użycie lub zastosowanie regulatora w sytuacjach nietypowych, związanych z nieliniowościami obiektu, możliwością wykorzystania pomiaru dodatkowych wielkości w obiekcie, lub potrzebą działania w warunkach niepełnej informacji początkowej o obiekcie. Niektóre z tych rozwiązań będą dalej opisane.

3.5 Regulacja dwu- i trójstawna

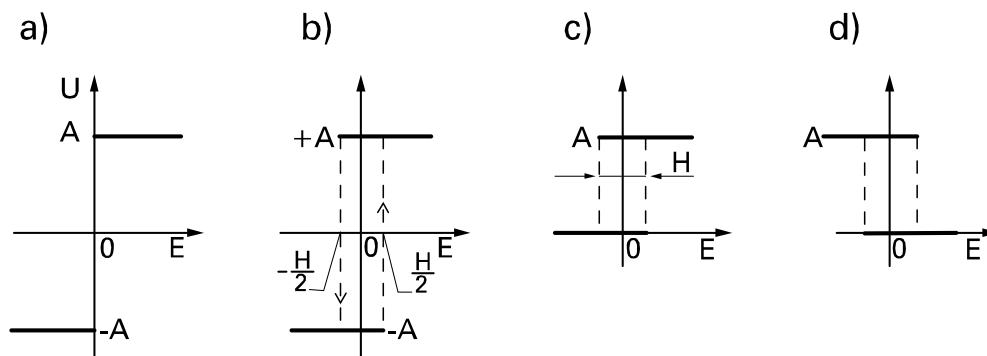
Układ regulacji nazywamy układem regulacji dwustawnej (dwupołożeniowej, dwustanowej), jeżeli sygnał sterujący obiekt otrzymywany na wyjściu urządzenia sterującego może przyjmować tylko dwie wartości. Algorytm regulatora można więc zapisać wzorem:

$$u = A \operatorname{sgn} e$$

gdzie funkcja signum (znak) przyjmuje wartości
$$\begin{cases} 1 & \text{dla } e > 0 \\ -1 & \text{dla } e < 0 \\ \text{nieokreślony} & \text{dla } e = 0 \end{cases}$$

Urządzenie sterujące zawiera więc element nieliniowy charakteryzujący się dużym wzmocnieniem. Powszechność stosowania regulacji dwustawnej wynika z prostoty konstrukcji i niskiej ceny regulatora. Regulacja dwustawna daje najlepsze rezultaty w przypadkach, gdy obiekty regulacji charakteryzują się dużymi stałymi czasowymi, a więc na przykład w przypadku obiektów cieplnych.

Charakterystyki regulatorów dwustawnych różnią się od postaci teoretycznej w sposób podany na rys. 2.19, zależnie od wykonania technicznego i przeznaczenia. Przede wszystkim obserwuje się strefę niejednoznaczności (zwaną histerezą), czyli zjawisko zmiany wartości sygnału sterującego nie dla uchybu regulacji $e = 0$, lecz dla dwóch różnych jej wartości (na rysunku dla $e = \frac{H}{2}$ i $e = -\frac{H}{2}$) zależnie od poprzednich wartości uchybu – jak wskazują strzałki.



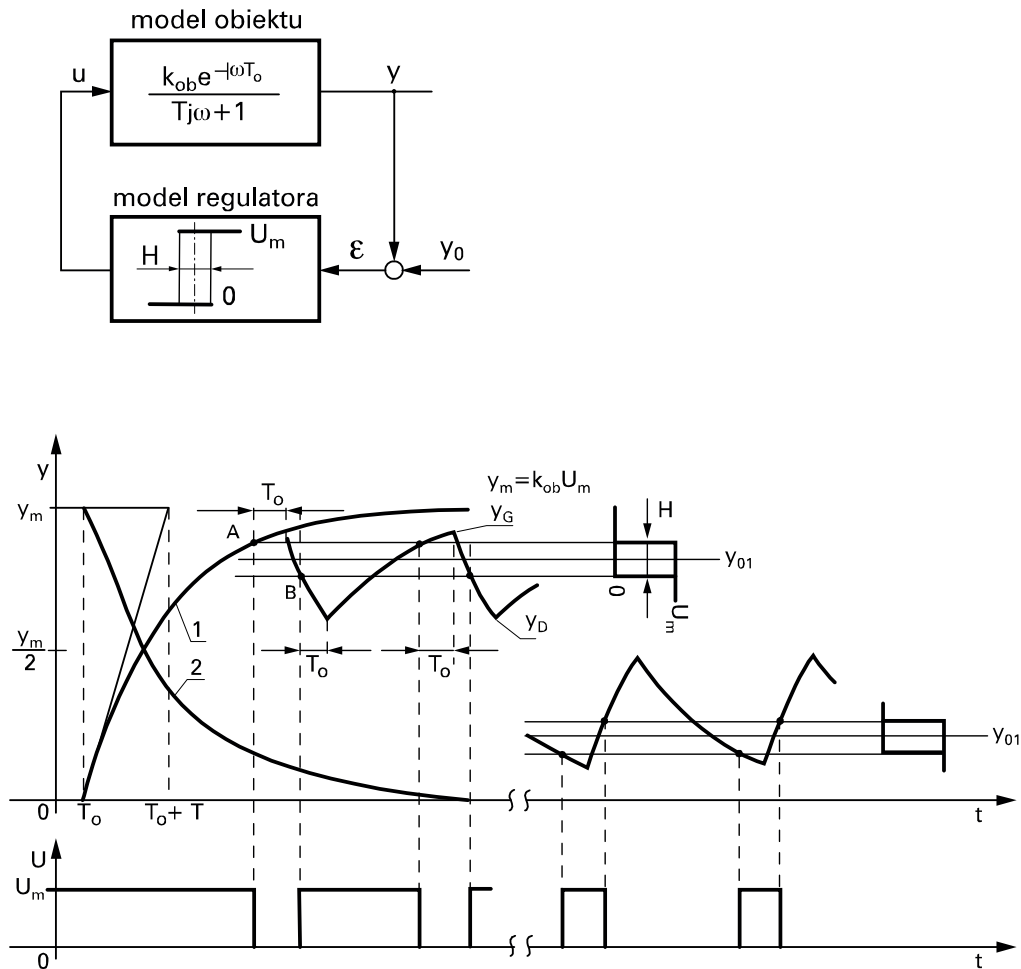
Rys. 3.2 Charakterystyki regulatorów dwustawnych:

- a) idealnego, b) rzeczywistego dwukierunkowego, c) rzeczywistego jednokierunkowego, d) rzeczywistego o działaniu odwróconym

Regulatory o charakterystykach takich, jak pokazano na rys. 3.2b są rzadko stosowane, ponieważ strumienie wielkości sterujących (masy, energii) mają charakter jednokierunkowy. Z tego też powodu należy uwzględnić silnie nieliniowy charakter obiektu objawiający się tym, że stałe czasowe dla przeciwnych kierunków sterowania mogą się znacznie różnić.

Układ regulacji dwustawnej jest silnie nieliniowy; do jego analizy należy więc stosować dość trudne metody właściwe dla takich układów. Do niektórych wniosków prowadzi natomiast metoda analizy przebiegów czasowych.

Dla przypadku idealnego – w strukturze pokazanej na rys. 3.3a – odpowiedź skokowa obiektu ma zwykle przebieg pokazany na rys. 3.3b krzywą 1 i charakteryzuje się opóźnieniem T_0 , stałą czasową inercji T oraz wzmocnieniem k_{ob} . Jeśli założyć na początku, że dla stanu wyłączenia regulatora odpowiedź skokowa obiektu jest odbiciem lustrzanym (krzywa 2), to przebiegi sygnałów w układzie regulacji są takie, jak zostało pokazane na rys. 3.3b, tzn. po zmianie wartości zadanej, przed osiągnięciem po raz pierwszy zerowej wartości uchybu obserwuje się długotrwałe załączenie sterowania, po czym osiąga się stan niegasnących oscylacji wokół wartości zadanej. Po przeprowadzeniu analizy przebiegów przedstawionych na rys. 3.3 i wpływu na ich kształt właściwości obiektu oraz regulatora, łatwo można znaleźć potwierdzenie m.in. następujących wniosków:



Rys. 3.3 Układ regulacji dwustawnej: a) schemat; b) przebiegi sygnałów

- regulacja jest możliwa tylko w zakresie wartości

$$0 < y < k_{ob} U_m$$

- na amplitudę oscylacji mają wpływ parametry dynamiki obiektu (T_0 , T , k_{ob}) i strefa niejednoznaczności H regulatora; wraz z jej zwiększeniem rośnie amplituda oscylacji;
- jakość regulacji może być często niezadowalająca; można ją wyrazić amplitudą oscylacji

$$\Delta y = \frac{y_G - y_D}{2}$$

i odchyleniem wartości średniej od wartości zadanej y_0 ;

- równość $y_{sr} = y_0$ zachodzi wówczas, gdy

$$y_0 = \frac{y_m}{2}$$

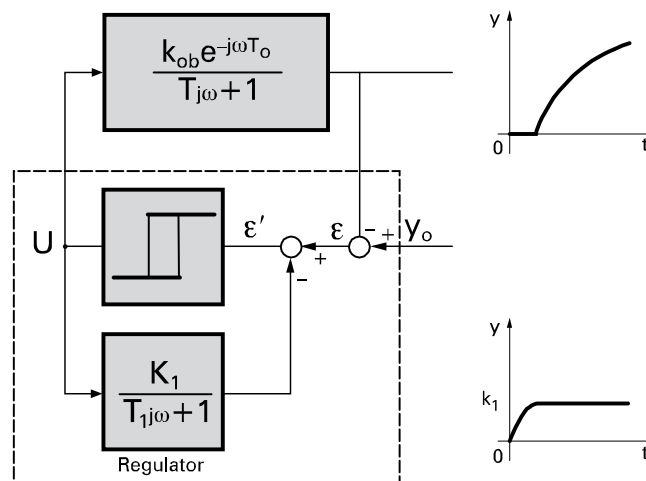
- zmniejszenie strefy niejednoznaczności poniżej pewnej wartości nie prowadzi do poprawy jakości.

Przebiegi w układzie z obiektem rzeczywistym odbiegają od przedstawionych wyżej; np. mogą nie wystąpić nieciągłości pochodnej, amplituda po pierwszym przekroczeniu wartości zadanej jest większa niż dla stanu ustalonego, jednak inne wnioski potwierdzają się.

Regulacja dwustawna zapewnia dobre wyniki dla obiektów o małym stosunku czasu opóźnienia do stałej czasowej inercji; małe są wtedy względne uchyby średnie i amplitudy drgań.

Dla stosunku $\frac{T_0}{T} > 0,2$ jakość regulacji jest niewielka. Zmniejszenie amplitudy oscylacji osiąga się przez zwiększenie częstotliwości przełączeń, co technicznie jest realizowane przez wprowadzenie ujemnego dynamicznego sprzężenia zwrotnego wokół regulatora.

Przykład takiego rozwiązania jest pokazany na rys. 3.4.



Rys. 3.4 Układ regulacji dwustawnej ze zmodyfikowanym regulatorem

Element korekcyjny ma tu charakter inercyjny o wzmacnieniu k_1 i stałej czasowej T_1 , o wartościach znacznie mniejszych od odpowiednich parametrów obiektu. Warunek

$$k_1 \ll k_{ob}$$

zapewnia m.in. niezmiennione właściwości układu dla dużych uchybów, zaś warunek

$$T_1 \ll T$$

należy do istoty tej korekcji: ponieważ element nieliniowy regulatora reaguje na sumę sygnałów

$$e' = y_0 - y - w$$

to szybsze zmiany składnika w powodują wcześniejsze wyłączenie elementu nieliniowego. Ujemne sprzężenie zwrotne inercyjne o małej stałej czasowej wywołuje wzrost częstotliwości oscylacji, a ponieważ obiekt ma dużą bezwładność, to amplituda sygnału wyjściowego y wywołana szybkimi zmianami sygnału wejściowego u nie będzie duża i tym mniejsza im większa będzie częstotliwość oscylacji. Duża częstotliwość oznacza jednak szybsze zużywa-

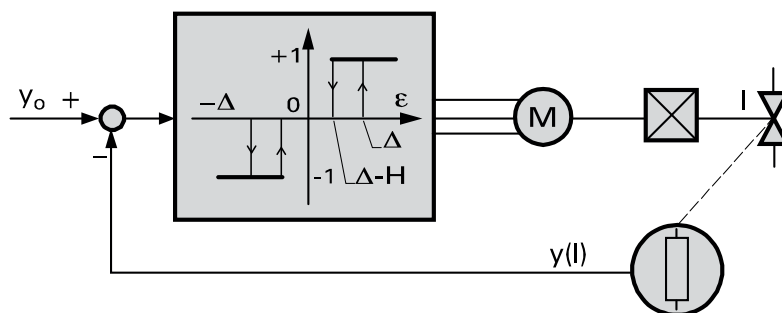
nie się elementów stykowych lub trudniejsze warunki pracy elementów przełączanych. W rozwiązaniach oferowanych przez niektóre firmy, w celu poprawy jakości przebiegów przez zwiększenie częstotliwości przełączeń, użyto specjalnych wibratorów przełączających sygnał sterujący.

Regulator dwustawny z korekcją we współpracy z obiektami o dużej bezwładności, uśredniającymi sygnały, wykazuje cechy regulatora proporcjonalno-różniczkującego (PD). Po zmodyfikowaniu członu sprzężenia zwrotnego można uzyskać właściwości charakterystyczne dla regulatora PID.

Typowym elementem podlegającym sterowaniu za pomocą regulatora trójstawnego jest silnik o stałej prędkości, pracujący w układzie serwomechanizmu przekąźnikowego, używany do sterowania zaworem, pokazany na rys. 3.5. Stanom +1 i -1 odpowiada załączenie silnika w prawo lub w lewo, 0 – oznacza stan spoczynku. Regulator ma strefę nieczułości 2Δ i histerezę H . Obiektem jest silnik o małej bezwładności, którego sygnałem wyjściowym jest położenie. Po dużym skoku wartości zadanej, powrót do stanu równowagi będzie następował ze stałą prędkością (odpowiadającą sterowaniu sygnałem +1 lub -1), a zatrzymanie silnika nastąpi zaraz po jego wyłączeniu w punktach

$$e_1 = \Delta - H \text{ lub } e_2 = -\Delta + H$$

W praktyce położenie osiągnięte nieznana z góry wartość leżąca w strefie nieczułości. Żadne przyczyny wpływające na zmianę uchybu w zakresie $[-\Delta, +\Delta]$ nie wpływają na zmianę wysterowania silnika, zatem układ regulacji osiąga stan ustalony z dokładnością do strefy nieczułości. Metody poprawy jakości regulacji przez zmniejszenie tej strefy mają ograniczoną skuteczność, bowiem łatwo dojść do przebiegu oscylacyjnego tłumionego, a nawet do niegasnących drgań wokół strefy nieczułości.

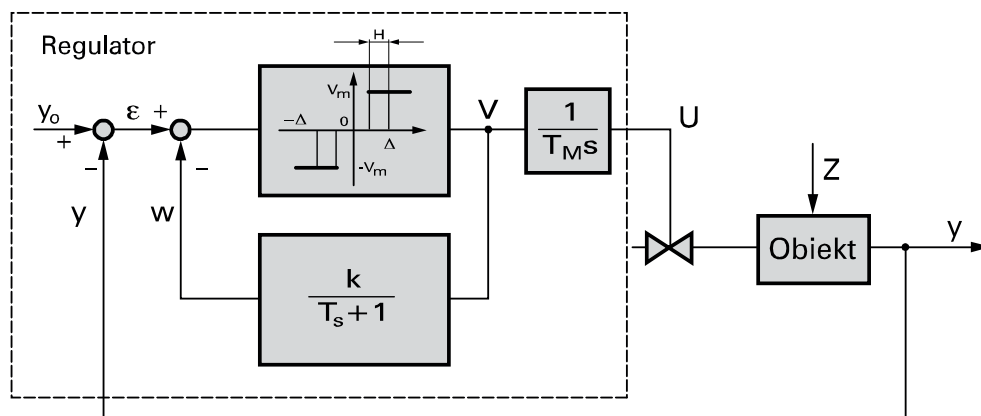


Rys. 3.5 Układ trójstawnej regulacji położenia zaworu

Układy o strukturze z rys. 3.5 są budowane jako zespoły wykonawcze dla regulatorów uniwersalnych z wyjściem ciągłym: y_0 jest wtedy sygnałem wyjściowym regulatora ciągłego, a zawór znajduje się np. w przewodzie zasilania obiektu. Próba "uproszczenia" układu przez eliminację ujemnego sprzężenia zwrotnego od położenia zaworu zakończy się niepowodzeniem, ponieważ czas przestawiania zaworu jest zwykle dużo krótszy niż stałe czasowe wyni-

kające z bezwładności obiektu. Wtedy przy $\Delta > 0$ zawór będzie całkowicie otwarty, a po zmianie znaku uchybu – zamknięty. Zmniejszanie prędkości silnika osłabiałoby reakcje układu na szybkozmienne zakłócenia pracy obiektu.

Poprawę sytuacji osiąga się, analogicznie do korekcji regulatora dwustawnego, przez objęcie elementu trójstawnego dynamicznym sprzężeniem zwrotnym – na przykład w strukturze pokazanej na rys. 3.6. Fragment objęty linią przerywaną nazywa się regulatorem krokowym.



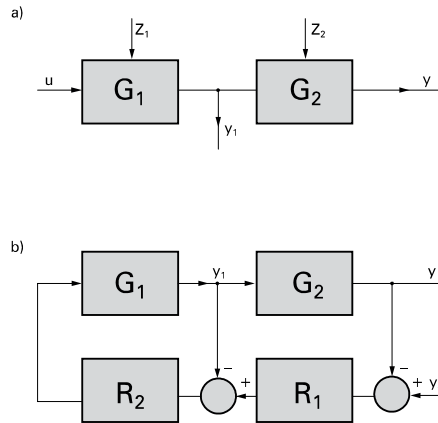
Rys. 3.6 Schemat układu regulacji krokowej

Łatwo można prześledzić, że dla stałej wartości uchybu e uzyskuje się sygnał v w postaci ciągu impulsów o częstotliwości i wypełnieniu zależnym od wartości uchybu; średni czas załączenia silnika zależy więc od uchybu. Silnik porusza się krokami – stąd nazwa regulatora. Analizując działanie regulatora pod względem wartości średnich sygnału sterującego można wykazać, że regulator krokowy z jednoinercyjnym sprzężeniem zwrotnym realizuje algorytm proporcjonalno-całkujący (PI). Na jego parametry dynamiczne ma wpływ prędkość użytego silnika z przekładnią; miarą tej prędkości jest czas przestawiania zaworu o cały dopuszczalny skok.

Z punktu widzenia obiektu regulator krokowy jest regulatorem ciągłym – dopuszczalne są wszystkie wartości sterowania z zakresu nastawnika. Dobór nastaw odbywa się według zasad obowiązujących dla regulatorów ciągłych.

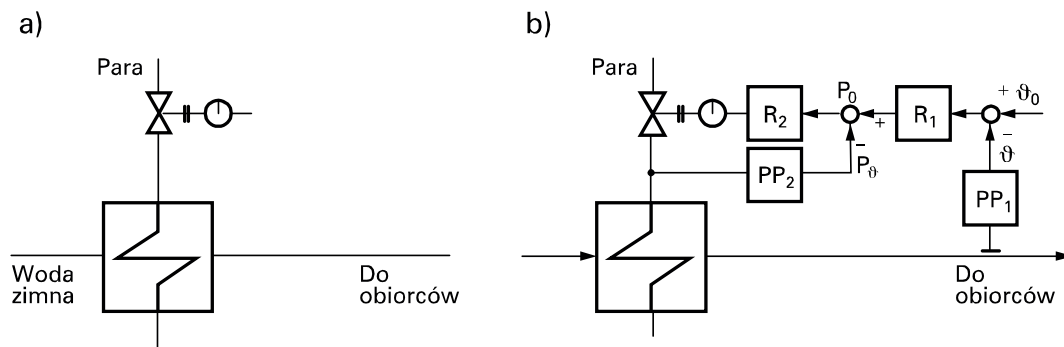
3.6 Regulacja kaskadowa

W przypadku, gdy w obiekcie da się wyodrębnić dwie części, a na wyjściu z pierwszej można uzyskać pomiar wielkości pośredniczącej obciążonej już skutkami zakłóceń oddziałujących w części pierwszej, czyli gdy występuje sytuacja pokazana na rys. 3.7a, (zakłócenia działają w części pierwszej), wtedy znaczną poprawę warunków regulacji można uzyskać w układzie o strukturze pokazanej na rys. 3.7b, zwanej układem regulacji kaskadowej.



Rys. 3.7 Schemat układu regulacji kaskadowej

Nie są to bynajmniej sytuacje rzadkie. Przykładowo, na rys. 3.8a pokazany jest wymiennik ciepła.



Rys. 3.8 Obiekt o strukturze odpowiedniej dla regulacji: kaskadowej (a), przykładowa struktura tej regulacji (b)

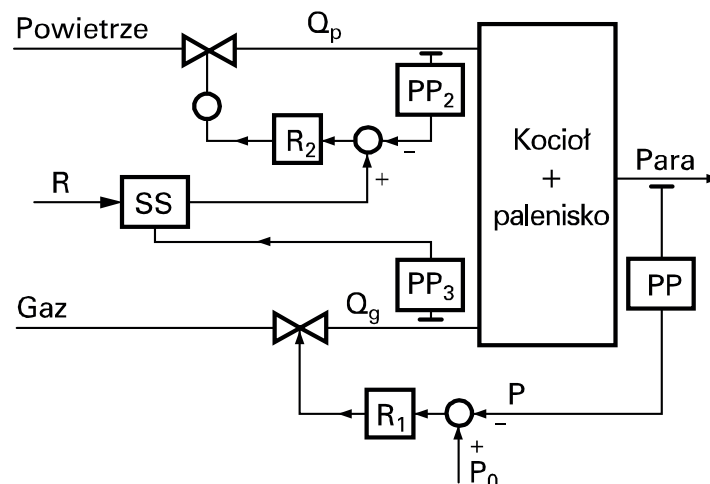
Obiekt składa się z układu zasilania parą i samego wymiennika. W układzie zasilania zakłóceniami są zmiany ciśnienia i temperatury pary, w wymienniku – wahania poboru wody przez odbiorców oraz temperatura wody zimnej. Jeżeli głównym zakłóceniem są wahania ciśnienia pary, to w układzie pokazanym na rys. 3.8b, dzięki zastosowaniu regulatora R_2 reakcja na nie będzie szybsza niż wtedy, gdyby następowała po zmianie temperatury wody na wyjściu wymiennika. Pomocniczy regulator R_2 (zwany też nadążnym lub podrzędnym) zapewnia mniejsze wahania sygnału sterującego wymiennikiem. Ponadto w pętli regulatora R_2 znajduje się zawór sterujący – element nieliniowy; ujemne sprzężenie zwrotne linearyzuje jego charakterystykę. Jako R_2 wystarczający jest zwykle regulator proporcjonalny (P), nie stawia się bowiem wielkich wymagań na uchyb wielkości pomocniczej (ciśnienia). Regulator R_1 (zwany nadrzędnym lub wiodącym) zapewnia regulację (o wymaganej jakości) głównej wielkości regulowanej (w przykładzie – temperatury wody) jednak nie bezpośrednio lecz przez wytworzenie wartości zadanej dla regulatora nadążnego. Regulator nadrzędny realizuje algorytm z całkowaniem. Teoria struktury kaskadowej jest dobrze poznana. Wynikają z niej korzyści w postaci:

- ◆ skuteczniejszej kompensacji zakłóceń, dzięki sprzężeniu zwrotnemu od wielkości mierzonej szybciej reagującej na zakłócenia,
- ◆ linearyzacji charakterystyk objętych sprzężeniem zwrotnym, przez co uzyskuje się mniejszą zależność dynamiki układu od punktu pracy,
- ◆ większych zapasów stabilności układu, dzięki zmianie wartości zastępczych stałych czasowych obiektu wywołanej zastosowaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego. Użycie regulatora R_2 o wzmacnieniu k_p powoduje w przybliżeniu k_p -krotne zmniejszenie stałej czasowej inercji w części G_1 obiektu. Dzięki temu regulator nadrzędny “widzi” obiekt zmodyfikowany w korzystnym kierunku, przez co możliwe jest zastosowanie w nim większego wzmacnienia i poprawę częstotliwościowego wskaźnika jakości regulacji.

Aby realizacja układu regulacji kaskadowej była możliwa, regulator R_2 musi mieć możliwość przyjmowania zewnętrznej wartości zadanej. Uruchamianie układu odbywa się wieloetapowo – od stanu, gdy oba regulatory znajdują się w trybie pracy ręcznej. Najpierw uruchamia się układ z regulatorem nadążnym w takim punkcie pracy dla części G_1 , który zapewnia znalezienie się w okolicy punktu pracy dla części G_2 . Następnie uruchamia się regulator nadrzędny używając standardowych procedur doboru nastaw.

3.7 Regulacja stosunku (ratio)

Jest szereg procesów, których prawidłowy bieg uwarunkowany jest utrzymaniem określonego stosunku ilościowego dwóch wielkości wejściowych. Patrząc wyłącznie na schemat obiektu z oznaczonymi wielkościami wejściowymi i wyjściowymi łatwo zauważyć, że dla regulacji stosunku mamy sytuację odwrotną w porównaniu z obiektami charakterystycznymi dla regulacji kaskadowej – tam obiekty miały jedno wejście i dwa wyjścia (główne i pomocnicze). Typowym przykładem jest proces spalania, którego sprawność zależy od stosunku ilości utleniacza do paliwa. W przykładzie pokazanym na rys. 3.9 wielkością regulowaną jest ciśnienie pary, a główną wielkością sterującą jest natężenie przepływu gazu opałowego Q_g .



Rys. 3.9 Przykładowy układ regulacji stosunku przepływów

Sygnal reprezentujący przepływ gazu wymusza, za pośrednictwem bloku SS realizującego operację mnożenia, wartość zadaną dla regulatora R_2 przepływu powietrza Q_p . Zazwyczaj blok SS realizuje algorytm

$$Q_{p0} = RQ_g + B$$

Wartość liczbowa wielkości wejściowej R (Ratio) bloku SS wyraża pożądany stosunek przepływów regulowanych wielkości i jest nastawiany np. przez osoby użytkujące instalację grzewczą. Parametr B (Bias) możliwy do nastawienia np. w granicach -100% , 100% zakresu sygnału pozwala dobrać stałe przesunięcie wartości zadanej stosownie do właściwości obiektu; w tym miejscu dla ustalenia uwagi można przyjąć $B = 0$. Zatem $Q_p = S Q_g$. Regulatory stosunku są więc aparatami przyjmującymi zewnętrzną wartość zadaną, pod względem dynamicznym zaś realizują algorytm PID.

W literaturze podawane są też inne struktury układów regulacji stosunku charakteryzujące się różnymi zdolnościami kompensacji zakłóceń. Wybór konkretnej z nich powinien być poprzedzony analizą dynamiki oddziaływania obu wielkości wejściowych na główną wielkość regulowaną oraz analizą charakteru zakłóceń.

Przykład konkretnej realizacji regulacji stosunku dwóch wielkości zostanie przedstawiony w przykładzie w rozdz. 5.

4. Dobór nastaw regulatora – samostrojenie

Dobór nastaw regulatora składa się właściwie z dwóch etapów. Pierwszy, to ustalenie struktury – nazywa się to konfiguracją regulatora; drugi, to wybór wartości liczbowych nastaw dynamicznych; nazywa się to parametryzacją regulatora. Jest oczywiste, że odpowiednimi nastawami są te, które zapewniają stabilność układu regulacji z określonym zapasem bezpieczeństwa, a także realizację celu sterowania oraz spełnienie założonych wymagań dotyczących jakości. Opracowanie niniejsze nie ma na celu uczyć sztuki projektowania układów regulacji, lecz poznanie typowych procedur pozwalających osiągnąć zadowalające wyniki, które po bliższym poznaniu właściwości układu będą stopniowo poprawiane. W miarę ogólne metody projektowe opisywane w literaturze dotyczą przypadków modeli liniowych, zaś faktycznie obiekty muszą pracować w szerokim zakresie zmian sygnałów. Podczas rozruchu procesów technologicznych lub przy dużych zmianach wartości zadanej można doświadczyć wpływu nieliniowości. Zatem przyjmowanie modeli liniowych jest usprawiedliwione tylko dla niewielkich odchylenia od punktów pracy.

Kolejna, dość zrozumiała uwaga dotyczy możliwości zdobycia, a następnie wykorzystania informacji o obiekcie. Procedury oparte o "tanie" i niezbyt dokładne metody identyfikacji obiektu nie mogą zapewnić spełnienia wysokich wymagań dokładności, mogą też dawać wyniki odbiegające od wartości deklarowanych przez autorów procedur. Trzeba bowiem mieć świadomość, że procedury te powstawały z wykorzystaniem badań symulacyjnych dla typowych obiektów i typowych wymagań jakości.

Większość zadań automatyki przemysłowej dotyczy kompensacji zakłóceń. W przypadku braku szczegółowych informacji dotyczących zakłóceń przyjmuje się, że zakłócenia mają postać wymuszeń skokowych, a najtrudniejszy przypadek dotyczy ich obecności na wejściu obiektu.

W kolejnych punktach zostaną opisane implementowane w regulatorach cyfrowych procedury identyfikacji obiektu oraz procedury obliczania nastaw PID regulatorów wraz z wymaganiami dotyczącymi procesów przejściowych w układzie regulacji (kryteriami jakości), które są używane jako warunki wyboru ścieżki realizacji obliczeń w miejscach rozgałęzienia programu.

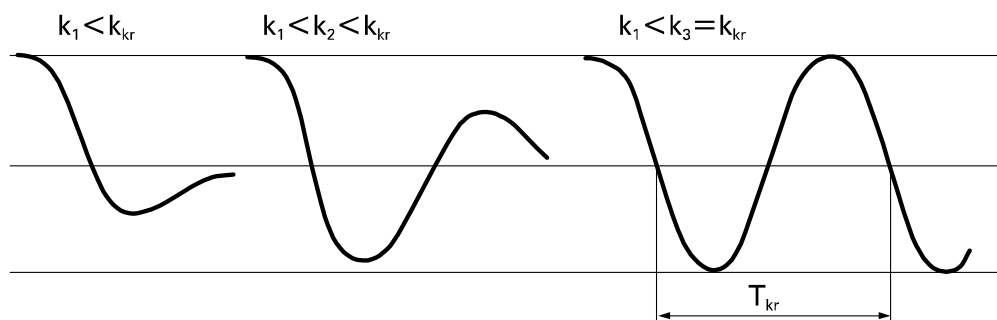
4.1 Metoda Zieglera-Nicholsa

Najłatwiejszą do uzyskania charakterystyką obiektu jest odpowiedź skokowa. Należy tylko zaznaczyć, że w eksperymencie identyfikacyjnym zmierzającym do wyznaczenia nastaw regulatora, pod pojęciem obiektu rozumie się wszystkie elementy układu regulacji (łącznie z urządzeniami pomiarowymi i wykonawczymi) za wyjątkiem regulatora.

Najpopularniejszą z metod doboru nastaw regulatorów jest metoda zaproponowana już w latach 40-tych ubiegłego stulecia przez Zieglera i Nicholasa. Wykorzystuje się w niej informacje dotyczące obiektu wyznaczone podczas specjalnego badania go w układzie zamkniętym z użyciem prostego regulatora typu P. Kolejne kroki procedury są następujące:

- ♦ wyłączyć, o ile było używane, działanie całkujące (I) oraz różniczkujące (D) regulatora;
- ♦ używając tylko regulatora P, doprowadzić układ regulacji (zamknięty !) – przez zwiększanie wzmocnienia proporcjonalnego – do granicy stabilności (drgań niegasnących) po czym zanotować wzmocnienie krytyczne k_{kr} i okres oscylacji T_{kr} (rys. 4.1).

Uwaga: W układzie znajdującym się na granicy stabilności wszystkie sygnały wykazują drgania niegasnące o tej samej częstotliwości, dlatego wyznaczenie okresu oscylacji można wykonać na podstawie obserwacji dowolnego z nich.



Rys. 4.1 Wyniki eksperymentów w metodzie Zieglera-Nicholsa

- ♦ na podstawie zmierzonych parametrów przyjmować nastawy regulatorów obliczane według następujących wzorów:

Tablica 4.1 Nastawy regulatora wg klasycznej procedury Zieglera-Nicholsa

	k_p	T_i	T_d
P	$0,5 k_{kr}$	-----	-----
PI	$0,45 k_{kr}$	$0,85 T_{kr}$	-----
PID	$0,6 k_{kr}$	$0,5 T_{kr}$	$0,12 T_{kr}$

Metoda jest powszechnie cytowana, a jej szczególne modyfikacje są implementowane w algorytmach automatycznego doboru nastaw. Nie można jednak nie zwrócić uwagi na dwa istotne jej aspekty

Podczas badań należy doprowadzić układ do granicy stabilności! W procesach przemysłowych wszelkie odchylenie od punktu pracy wiąże się ze stratami energii i surowców, a co najmniej pogorszeniem jakości produktu, dlatego tak drastyczne odchylenia, w niektórych przypadkach nawet groźne dla instalacji produkcyjnej, mogą być niedopuszczalne. Zatem planowanie eksperymentu Zieglera-Nicholsa musi być poprzedzone uzgodnieniami z użytkownikami obiektu.

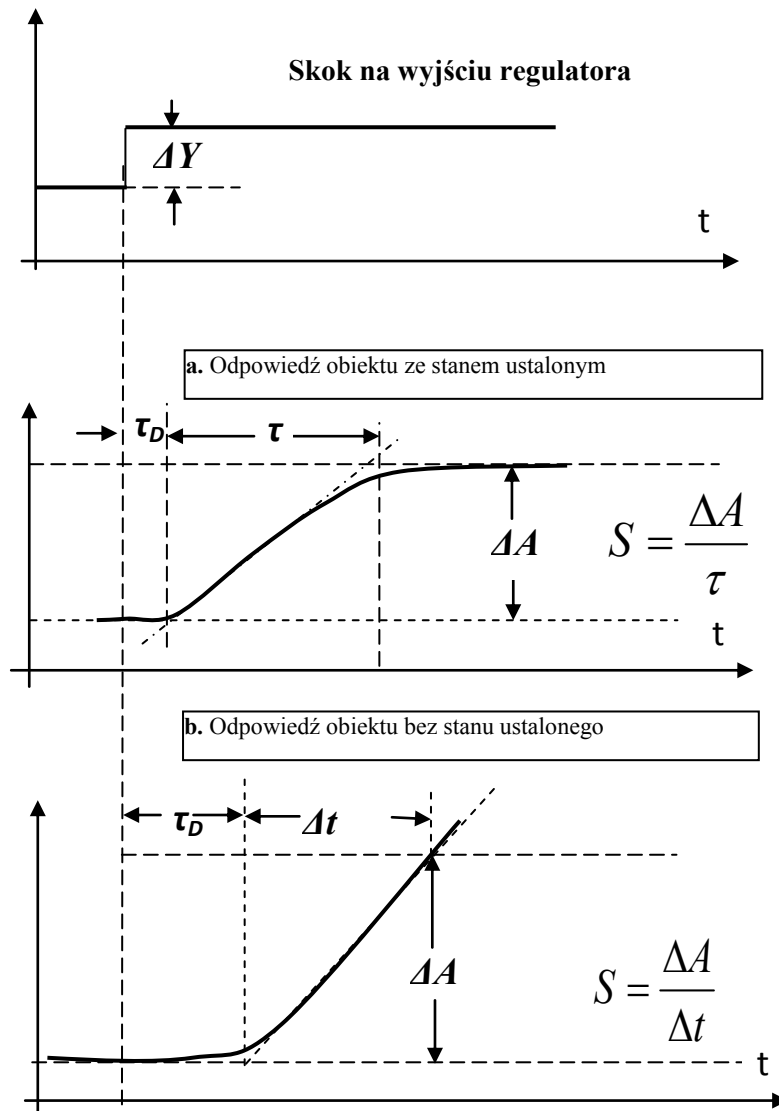
Nie ma też określonych miar jakości procesu uzyskiwanych z tak dobranymi nastawami. Należy się liczyć z tym, że w konkretnym przypadku jakość nie będzie zadowalająca. Metodę należy zatem traktować jako skuteczną dla przypadku typowych obiektów i użyteczną dla ustalenia bazy wyjściowej do poprawy nastaw podczas dalszego użytkowania układu regulacji. Z tych powodów wydają się nie mieć znaczenia nieznaczne różnice wartości liczbowych współczynników w powyższych wzorach, jakie spotyka się w opracowaniach różnych autorów.

Pewną modyfikacją klasycznego eksperymentu Zieglera-Nicholsa jest eksperyment realizowany w „układzie otwartym”, patrz rys. 4.2

Tablica 4.2 Nastawy regulatora wyliczane dla stanu ustalonego i dla przypadku bez stanu ustalonego

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{\tau_D S^*}$	-----	-----
PI	$\frac{0,9}{\tau_D S^*}$	$3,33\tau_D$	-----
PID	$\frac{1,2}{\tau_D S^*}$	$2,0\tau_D$	$0,5\tau_D$

$$S = \frac{\Delta A}{\tau} \quad \text{lub} \quad S = \frac{\Delta A}{\Delta t} ; \quad S^* = \frac{S}{\Delta Y}$$



Rys. 4.2 Eksperyment „skoku jednostkowego” a). odpowiedź obiektu ze stanem ustalonym, b). odpowiedź obiektu bez stanu ustalonego

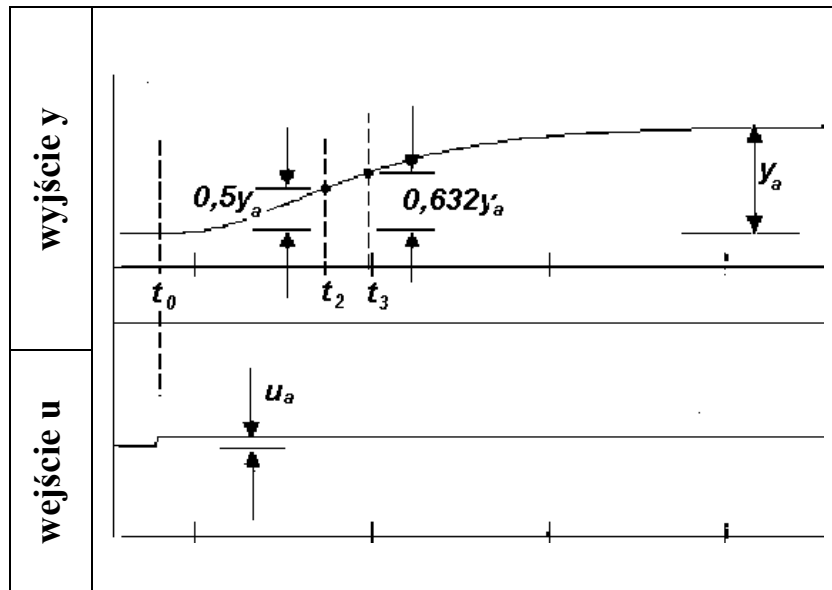
4.2 Metoda Cohena-Coona

Identyfikacja dynamiki obiektu metodą Cohena-Coona, realizowana jest w układzie otwartym tzn. po doprowadzeniu procesu do stanu równowagi, należy regulator przełączyć w tryb pracy ręcznej.

Metoda bazuje na badaniu czasów odpowiedzi wyjścia obiektu y , na skok sygnału wartości wejściowej u , gdzie:

- t_0 – określa moment realizacji skoku wartości sygnału mierzonego,
- t_2 – jest to czas po którym wartość sygnału wyjściowego osiąga 50% wartości ustalonej,
- t_3 – jest to czas po którym wartość sygnału wyjściowego osiąga 63,2% wartości ustalonej,

u_a – jest to wartość skoku wielkości wejściowej u ,
 y_a – jest to wartość ustalona wielkości wyjściowej y



Rys. 4.3 Wymuszenie i odpowiedź dla eksperymentu Cohena-Coona

Na podstawie zmierzonych wartości t_0 , t_2 , t_3 , u_a i y_a obliczane są parametry określające dynamikę procesu (obiektu):

τ - stała czasowa obiektu

τ_D - opóźnienie obiektu

K - wzmacnienie obiektu

Dla uproszczenia zapisu wzorów końcowych, przyjęto:

$t_1 = \frac{[t_2 - \ln(2)t_3]}{[1 - \ln(2)]}$	$\tau = t_3 - t_1$	$\tau_D = t_1 - t_0$	$r = \frac{\tau_D}{\tau}$	$K = \frac{y_a}{u_a}$
--	--------------------	----------------------	---------------------------	-----------------------

Tablica 4.3 Nastawy regulacji PID oblicza się wg poniższej tablicy

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{Kr} \left(1 + \frac{r}{3}\right)$	-----	-----
PI	$\frac{1}{Kr} \left(0,9 + \frac{r}{12}\right)$	$\tau_D \frac{30 + 3r}{9 + 20r}$	-----
PID	$\frac{1}{Kr} \left(\frac{4}{3} + \frac{r}{4}\right)$	$\tau_D \frac{32 + 6r}{13 + 8r}$	$\tau_D \frac{4}{13 + 2r}$

W innych źródłach podano wzory przedstawione w tabeli 4.4

Dla uproszczenia zapisów przyjęto:

$$\alpha = \frac{K\tau_D}{T}; \quad \tau' = \frac{\tau_D}{\tau_D + T}$$

Tablica 4.4 Wyliczane nastawy PID dla eksperymentu Cohena-Coona

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{0,35\tau'}{1-\tau'} \right)$	-----	-----
PI	$\frac{0,9}{\alpha} \left(1 + \frac{0,92\tau'}{1-\tau'} \right)$	$\frac{3,3 - 3,0\tau'}{1 + 1,2\tau'} \tau_D$	-----
PD	$\frac{1,24}{\alpha} \left(1 + \frac{0,13\tau'}{1-\tau'} \right)$	-----	$\frac{0,27 - 0,36\tau'}{1 - 0,87\tau'} \tau_D$
PID	$\frac{1,35}{\alpha} \left(1 + \frac{0,18\tau'}{1-\tau'} \right)$	$\frac{2,5 - 2,0\tau'}{1 - 0,39\tau'} \tau_D$	$\frac{0,37 - 0,37\tau'}{1 - 0,81\tau'} \tau_D$

4.3 Metoda Pessena

W ślad za Zieglerem i Nicholsem poszli inni badacze, podając swoje zależności na dobór nastaw regulatorów. Przykładem mogą być nastawy podane przez **Pessena** dla regulatora PID. Jak widać w tablicy 4.5, przy znacznym zmniejszeniu współczynnika wzmocnienia regulatora k_p , zwiększono działanie parametrów T_i i T_d . Parametry k_{kr} i T_{kr} pochodzą z klasycznego eksperymentu Zieglera-Nicholsa.

Tablica 4.5

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
PID	$0,2k_{kr}$	$0,33T_{kr}$	$0,5 T_{kr}$

4.4 Metoda Hassena i Offereissena

Podobny sposób doboru nastaw dla regulatora, został zaproponowany przez **Hassena i Offereinsa**

Metoda ta eliminuje pomiar okresu oscylacji, ale wymaga aby:

1. wyłączyć działanie całkujące regulatora,
2. zwiększać stopniowo wzmocnienie regulatora k_p , doprowadzając układ regulacji do granicy stabilności i określając k_{pkryt} ,
3. przyjąć nastawę wzmocnienia regulatora $k_p = 0,45 k_{pkryt}$,

- zmniejszać czas całkowania regulatora T_i tak długo, aż układ regulacji znajdzie się na granicy stabilności – będzie to wartość T_{ikryt} ,
- przyjąć $T_i = 3 T_{ikryt}$,

Tablica 4.6

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
PI	$0,45k_{pkryt}$	$3T_{ikryt}$	-----

W przypadku zastosowania tej metody dla regulatora PID:

- należy wykonać kroki 1 – 5, tak jak dla regulatora PI,
- zwiększać czas różniczkowania T_d do takiej wartości T_{dmax} przy której występuje maksymalne tłumienie.
- nastawić $T_d = 1/3 T_{dmax}$
- ustawić $T_i = 4,5 T_{dmax}$,
- zmniejszać k_p aż do uzyskania pożądanego tłumienia

Tablica 4.7

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
PID	$0,45k_{pkryt}$	$4,5T_{dmax}$	$\frac{T_{dmax}}{3}$

4.5 Metoda identyfikacji dynamiki obiektu wg Strejca

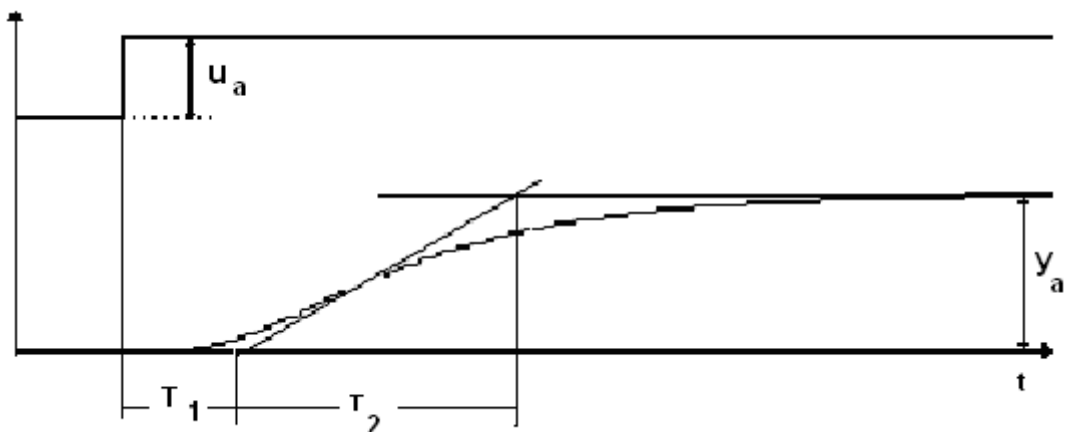
Metoda Strejca realizowana jest w układzie otwartym. Metoda stosowana jest do obiektów, których odpowiedź skokowa charakteryzuje się „punktem przegięcia”. Transmittancja takich obiektów przedstawiona jest w postaci:

$$G(s) = \frac{Ke^{-T_0s}}{(Ts + 1)^n}$$

Stałe czasowe uzyskuje się realizując skok wielkości wejściowej obiektu u_a i analizując odpowiedź obiektu y_a .

u_a – wejście obiektu

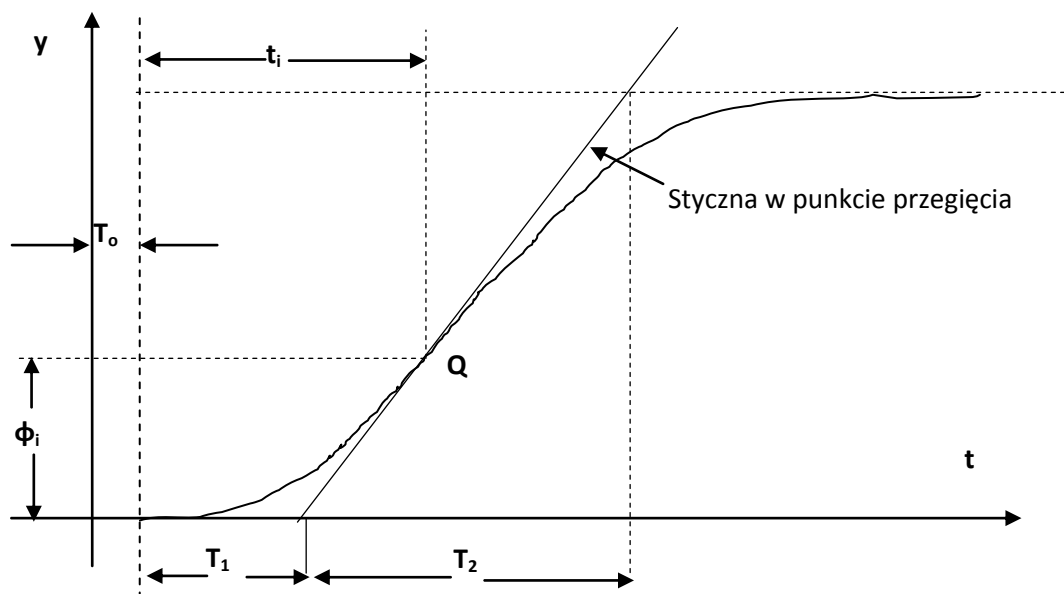
y_a – zmienna procesowa (wyjście obiektu)



Rys. 4.5 Skok identyfikacyjny oraz odpowiedź obiektu

$$K = \frac{y_a}{u_a}$$

Odpowiedź skokowa obiektu statycznego z uwzględnieniem czasu opóźnienia T_0 , stałych czasowych T_1 i T_2 oraz współrzędnych punktu przegięcia, przedstawiono na rys. 4.6.



Rys. 4.6 Uszczegółowiona charakterystyka skokowa obiektu

Tablica 4.8

n	T_2/T	T_1/T	T_1 / T_2	t_i/T	i
1	1	0	0	0	0
2	2,718	0,282	0,104	1	0,264
3	3,695	0,805	0,218	2	0,323

4	4,465	1,425	0,319	3	0,353
5	5,119	2,100	0,410	4	0,371
6	5,699	2,811	0,493	5	0,384
7	6,226	3,549	0,570	6	0,394
8	6,711	4,307	0,642	7	0,401
9	7,164	5,081	0,709	8	0,407
10	7,590	5,869	0,773	9	0,413

Postępowanie polega na:

1. wyznaczenie punktu przegięcia Q ,
2. obliczenie T_1/T_2 ,
3. z tablicy należy odczytać rząd układu zastępczego – jeżeli wartość T_1/T_2 znajduje się pomiędzy dwoma wierszami tablicy, należy przyjąć wartość mniejszą,
4. i na koniec wyznacza się stałą czasową układu zastępczego T , na podstawie t_i/T , sprawdzając następnie wg kolumn T_1/t i T_2/t .

Przykład: Dane wejściowe: $T_0 = 2,5s$; $T_1 = 8s$; $T_2 = 35s$; $t_i = 23s$

Obliczenia: $T_1/T_2 = 8/35 = 0,21$, odpowiada to układowi trzeciego rzędu – $n = 3$;

dla układu trzeciego rzędu, mamy $t_i/T = 2$, skąd otrzymujemy stałą czasową układu zastępczego: $T = t_i/2 = 23/2 = 11,5s$

Przybliżona transmitancja obiektu ma więc następującą postać:

$$G(s) = \frac{Ke^{-2,5s}}{(11,5s + 1)^3}$$

Można zatem przyjąć do dalszych obliczeń parametrów PID regulatora, zmodyfikowane stałe czasowe obiektu, a więc:

$$T_1 - T_0 = \tau_D \quad \text{oraz} \quad T = \tau$$

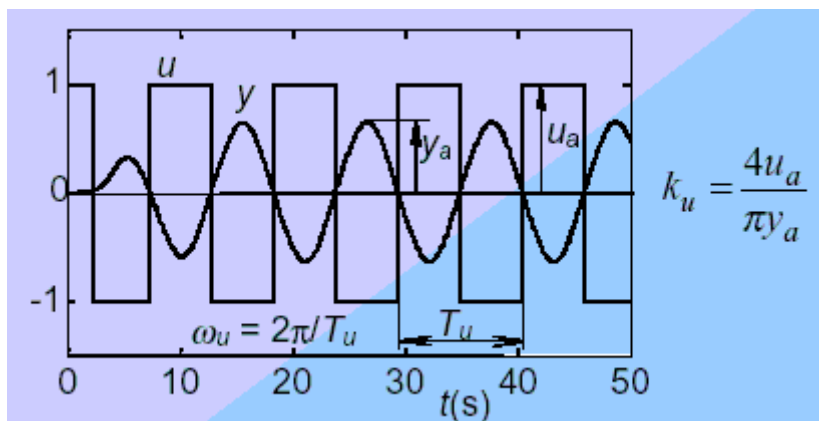
Do obliczeń można stosować kryteria jakości regulacji przedstawione w dalszej części opracowania np. kryterium ITAE.

4.6 Metoda identyfikacji dynamiki obiektu wg Äströma-Haglund (zwana "przeznaczniową")

1. Identyfikacja dynamiki obiektu odbywa się w układzie otwartym (patrz Rys. 1)
2. należy ustabilizować proces, tak aby stabilnej wartości sygnału wejściowego u_0 , odpowiadała stabilna wartość sygnału wyjściowego y_0
3. zadawać na wejściu impulsy o małej amplitudzie (takiej aby nie miało to wielkiego znaczenia w regulowanym procesie) wg poniższych warunków.

UWAGA: okres sygnału wymuszającego powinien być dobrany w zależności od dynamiki badanego obiektu, z uwzględnieniem poniższego warunku

$$u = \begin{cases} u_0 + u_a, & \text{jeżeli } \varepsilon \geq 0 \\ u_0 - u_a, & \text{jeżeli } \varepsilon < 0 \end{cases}$$



Rys. 4.7 Wymuszenia przekąźnikowe i odpowiedzi obiektu

4. na wyjściu powinien pojawić się przebieg o okresie T_u i amplitudzie y_a , jak przedstawiono na powyższym rysunku,
5. obliczamy współczynnik wzmocnienia k_u , wg. wzoru
- 6.

$$k_u = \frac{4u_a}{\pi y_a}$$

Nastawy regulacji PID obliczane są na podstawie klasycznych zależności Zieglera-Nicholsa

Tablica 4.9

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
P	$0,5k_u$	-----	-----
PI	$0,45k_u$	$0,83T_u$	-----
PID	$0,59k_u$	$0,5T_u$	$0,25T_u$

4.7 Metoda adaptacyjnego doboru nastaw

Procedura adaptacji zawiera następujące kroki:

1. identyfikacja obiektu „on-line”,
2. wyznaczenie krytycznego współczynnika wzmocnienia k_u i okresu oscylacji T_u , na podstawie eksperymentu Zieglera-Nicholsa lub eksperymentu przekąźnikowego Äströma-Haglund;
3. obliczenie pomocniczej wielkości k_1 wg zależności:

$$k_1 = \frac{1}{Kk_u}$$

gdzie: K – wzmacnienie obiektu

1. określenie nastaw regulatora PID wg wzorów:
- 2.

$$k_p = 0,33k_u e^{-0,31k_1 - k_1^2}$$

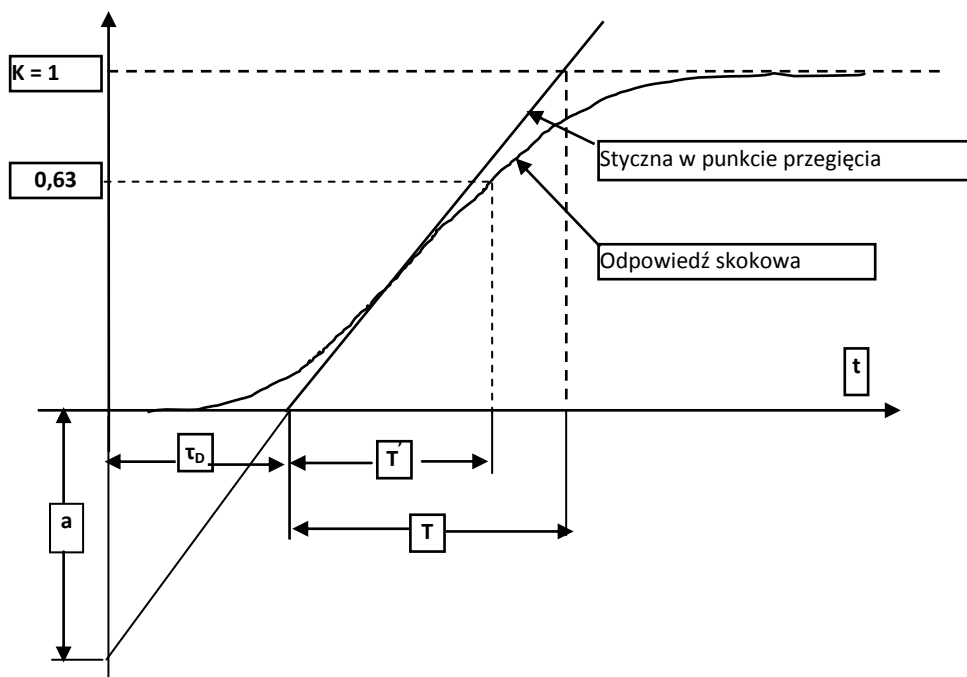
$$T_i = 0,76T_u e^{-1,6k_1 - 0,36k_1^2}$$

$$T_d = 0,17T_u e^{-0,46k_1 - 2,1k_1^2}$$

4.8 Kryteria jakości regulacji

4.8.1 Kryterium Chiena, Hronesa i Reswicka

Jakość regulacji polega na sterowaniu dynamiką regulatora, optymalizując przeregulowania oraz minimalizując czas regulacji. W odniesieniu do charakterystyki skokowej przedstawionej na rys. 4.8, kryteria jakości regulacji dla skokowej zmiany zakłócenia przedstawiono w tabelicy 4.10 oraz dla skokowej zmiany wartości zadanej w tabelicy 4.11.



Rys. 4.8 Charakterystyka skokowa obiektu inercyjnego

Tablica 4.10

Przeregulowanie	0%			20%		
Regulator	k_p	T_i	T_d	k_p	T_i	T_d
P	$0,3 \frac{1}{a}$	-----	-----	$0,7 \frac{1}{a}$	-----	-----
PI	$0,6 \frac{1}{a}$	$4\tau_D$	-----	$0,7 \frac{1}{a}$	$2,3\tau_D$	-----
PID	$0,95 \frac{1}{a}$	$2,4\tau_D$	$0,42\tau_D$	$0,3 \frac{1}{a}$	$2,0\tau_D$	$0,42\tau_D$

Tablica 4.11

Przeregulowanie	0%			20%		
Regulator	k_p	T_i	T_d	k_p	T_i	T_d
P	$0,3 \frac{1}{a}$	-----	-----	$0,7 \frac{1}{a}$	-----	-----
PI	$0,35 \frac{1}{a}$	$1,2T$	-----	$0,6 \frac{1}{a}$	T	-----
PID	$0,6 \frac{1}{a}$	T	$0,5\tau_D$	$0,95 \frac{1}{a}$	$1,4T$	$0,47\tau_D$

4.8.2 Inne znane i stosowane kryteria jakości regulacji

a). Kryterium: 2...5% przeregulowania, minimalny czas regulacji

Tablica 4.12

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
P	$0,9 \frac{T}{K\tau_D}$	-----	-----
PI	$0,6 \frac{T}{K\tau_D}$	$0,8\tau_D + 0,5T$	-----
PID	$0,95 \frac{T}{K\tau_D}$	$2,4\tau_D$	$0,4\tau_D$

b). Kryterium: 20% przeregulowania, minimalny czas regulacji

Tablica 4.13

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
P	$0,7 \frac{T}{K\tau_D}$	-----	-----
PI	$0,7 \frac{T}{K\tau_D}$	$\tau_D + 0,3T$	-----
PID	$1,2 \frac{T}{K\tau_D}$	$2,0\tau_D$	$0,4\tau_D$

c). Kryterium: $\int_0^{t_r} \varepsilon^2(\tau) d\tau$ minimum zwane ISE (Integral of Squared Error) gdzie: t_r – czas regulacji, ε – uchyb regulacji

Tablica 4.14

REGULATOR	k_p	T_i	T_d
P	-----	-----	-----
PI	$1,0 \frac{T}{K\tau_D}$	$\tau_D + 0,3T$	-----
PID	$1,4 \frac{T}{K\tau_D}$	$1,3\tau_D$	$0,5\tau_D$

d) Kryterium: $\int_0^{\infty} \tau |\varepsilon(\tau)| d\tau$ zwane ITAE (Integral of the Time weighted Absolute Error)

d1) kryterium redukcji zakłóceń wyjściowych

Tablica 4.15

	k_p	T_i	T_d
PI	$0,859 \frac{1}{K} \left(\frac{\tau_D}{T}\right)^{-0,977}$	$\frac{T}{0,674 \left(\frac{\tau_D}{T}\right)^{-0,680}}$	-----
PID	$1,357 \frac{1}{K} \left(\frac{\tau_D}{T}\right)^{-0,947}$	$\frac{T}{0,842 \left(\frac{\tau_D}{T}\right)^{-0,732}}$	$0,381T \left(\frac{\tau_D}{T}\right)^{0,995}$

d2) kryterium nadążania za wartością zadaną

Tablica 4.16

	k_p	T_i	T_d
PI	$0,586 \frac{1}{K} \left(\frac{\tau_D}{T}\right)^{-0,916}$	$\frac{T}{1,03 - 0,165 \left(\frac{\tau_D}{T}\right)}$	-----
PID	$0,965 \frac{1}{K} \left(\frac{\tau_D}{T}\right)^{-0,85}$	$\frac{T}{0,796 - 0,145 \left(\frac{\tau_D}{T}\right)}$	$0,308T \left(\frac{\tau_D}{T}\right)^{0,929}$

4.9 Podsumowanie samostrojenia

Według niektórych źródeł w przypadkach, gdy dobrymi obrazami właściwości obiektów statycznych i astatycznych oraz ich aproksymacji są przebiegi pokazane na rys 2.8, a wymaganie jakości to żądanie przebiegu przejściowego bez przeregulowania ($\kappa = 0\%$) albo z przeregulowaniem $\kappa = 20\%$ oraz żądanie małego czasu regulacji, wtedy nastawy poszczególnych rodzajów regulatorów można dobierać na podstawie tablicy 4.17.

Tablica 4.17 Nastawy regulatorów dla typowych obiektów

	$\kappa = 0$		$\kappa = 20\%$	
	obiekt statyczny	obiekt astatyczny	obiekt statyczny	obiekt astatyczny
P	$k_p = \frac{0,3}{k \frac{T_0}{T}}$ $t_r = 4,5T_0$	$k_p = 0,37 \frac{T}{T_0}$ $t_r = 5,5T_0$	$k_p = \frac{0,7}{k \frac{T_0}{T}}$ $t_r = 6,5T_0$	$k_p = 0,7 \frac{T}{T_0}$ $t_r = 7,5T_0$
PI	$k_p = \frac{0,6}{k \frac{T_0}{T}}$ $T_i = 0,8T_0 + 0,5T$ $t_r = 8,0T_0$	$k_p = 0,46 \frac{T}{T_0}$ $T_i = 5,75T_0$ $t_r = 13,2T_0$	$k_p = \frac{0,7}{k \frac{T_0}{T}}$ $T_i = T_0 + 0,3T$ $t_r = 12,0T_0$	$k_p = 0,7 \frac{T}{T_0}$ $T_i = 3,0T_0$ $t_r = 15,0T_0$

PID	$k_p = \frac{0,95}{k \frac{T_0}{T}}$	$k_p = 0,65 \frac{T}{T_0}$	$k_p = \frac{1,2}{k \frac{T_0}{T}}$	$k_p = 1,1 \frac{T}{T_0}$
	$T_i = 2,4T_0$	$T_i = 5,0T_0$	$T_i = 2,0T_0$	$T_i = 2,0T_0$
	$T_d = 0,4T_0$	$T_d = 0,23T_0$	$T_d = 0,4T_0$	$T_d = 0,37T_0$
	$t_r = 5,5T_0$	$t_r = 9,8T_0$	$t_r = 7,0T_0$	$t_r = 12,0T_0$

Z porównania podanych dotąd propozycji widać, że dość znacznie się one różnią. Nastawy wg Strejca wydają się mniej ostrożne. W literaturze można spotkać wiele tabel określających nastawy. Ponieważ tworzy się je w oparciu o szczegółowe modele procesów i wskaźników jakości, to mogą wystąpić między nimi spore różnice, a przed ich użyciem należy przyjrzeć się, przy jakich założeniach były sporządzone.

Przedstawione wyżej procedury wyznaczania nastaw regulatora opierały się na badaniu obiektu w układzie otwartym, bez sprzężenia zwrotnego.

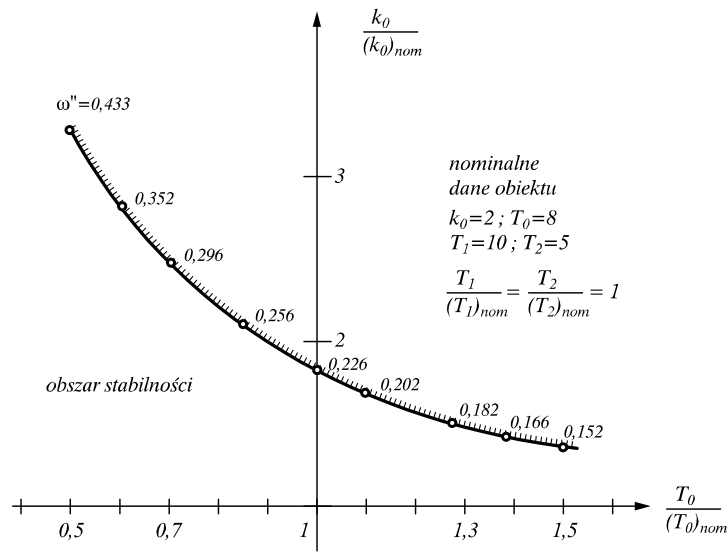
Należy też pamiętać, że dla obiektów z samowyrównywaniem ważnym parametrem charakteryzującym ich podatność na regulację jest stosunek czasu opóźnienia do zastępczej stałej czasowej inercji $\frac{T_0}{T}$. Gdy stosunek ten przekracza wartość 0,3 jakość sterowania z nawet najlepiej dobranym regulatorem PID znacznie się pogarsza. Poprawę można uzyskać przez modyfikację struktur, np. zastosowanie wieloobwodowych układów regulacji. Realizacja niektórych z nich zależy od możliwości pomiaru dodatkowych wielkości charakteryzujących proces.

Z praktycznego punktu widzenia, istotną cechą układu regulacji, jest jego odporność wyrażająca utrzymanie jego podstawowych właściwości przy zmianach parametrów obiektu: wzmocnienia k_0 , opóźnienia T_0 , i stałych czasowych T_1 . Dla określenia miary tej odporności wyznacza się granicę obszaru stabilności w przestrzeni parametrów. W pracy [11] podano przykład wyznaczenia granicy obszaru stabilności dla obiektu dwuinercyjnego z opóźnieniem

$$\frac{k_0 e^{-sT_0}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}$$

w układzie z regulatorem PID. W obliczeniach wykorzystano metodę Zieglera-Nicholsa doboru nastaw oraz warunek fazy i amplitudy dla układu znajdującego się na granicy stabilności.

Wykonując analogiczne obliczenia dla układu regulacji złożonego z tego samego obiektu i, kolejno, regulatorów różniących się postacią algorytmów, można dokonać porównania tych algorytmów analizując wielkość i kształt wyznaczonych obszarów stabilności.



Rys. 4.9 Granica obszaru stabilności dla obiektu dwuinercyjnego z opóźnieniem i regulatorem PID nastrojonym według zasad Zieglera-Nicholsa (według [WK11]).

Prowadzone dotąd rozważania dotyczyły przypadków liniowych z jednym wyjściem pomiarowym. W praktyce występują rozmaite typy nieliniowości, a także przypadki, w których możliwy jest dodatkowy pomiar różnych wielkości np. pozwalających na odtworzenie niektórych współrzędnych stanu lub odwzorowujących zakłócenia. Jest oczywiste, że na przykład każdy pomiar wykonywany bliżej źródła zakłóceń pozwala na wcześniejszą reakcję przeciwdziałania ich skutkom, a więc na poprawę jakości układu. Wiele modyfikacji struktur układów regulacji odnosi się do konkretnych typów obiektów stwarzających nowe możliwości pomiarowe i opartych na lepszym rozpoznaniu miejsca i źródeł zakłóceń.

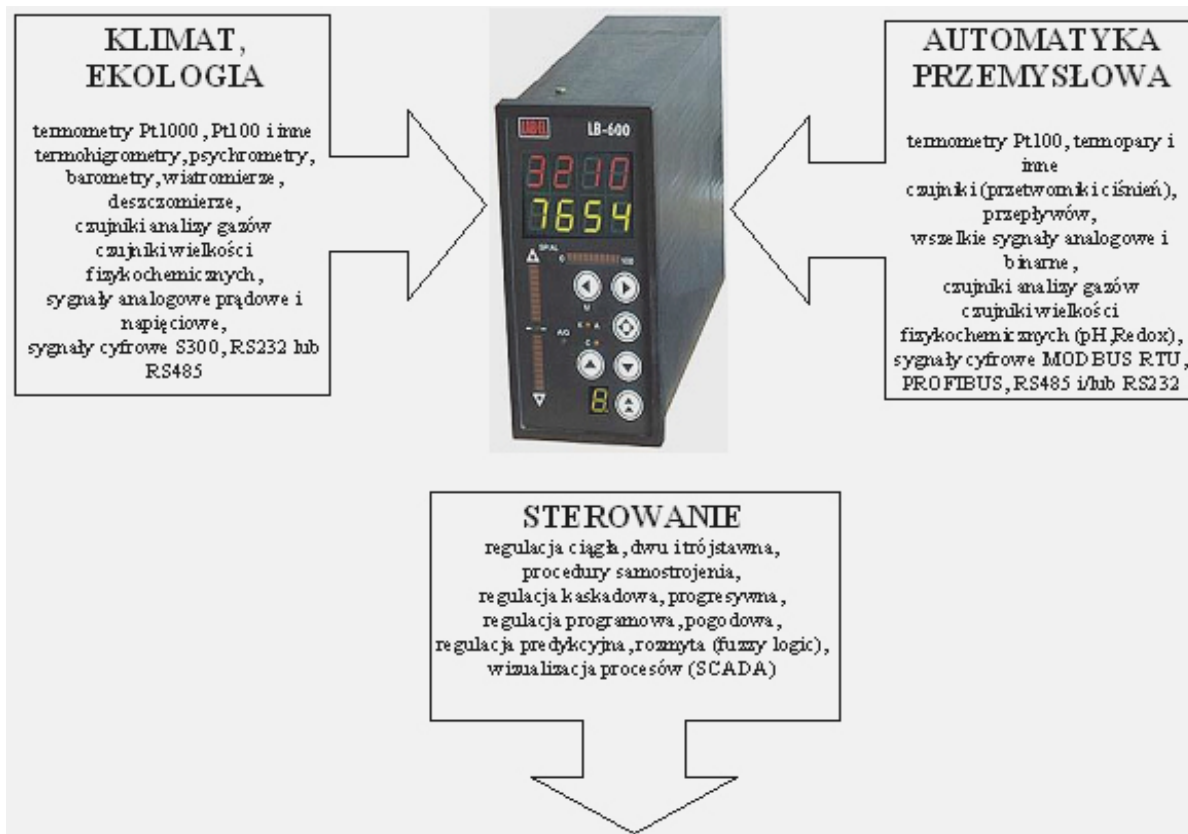
W przypadku prostych nieliniowości statyki układu i konieczności przechodzenia do różnych punktów pracy, najprostszym sposobem użycia regulatora jest skompletowanie nastaw dla różnych punktów pracy i uaktywnianie ich po dojściu do tych punktów.

Realizację opisanych wyżej algorytmów zapewnia regulator-sterownik LB-600 opracowany w firmie LAB-EL. Niżej podaję krótki opis konstrukcji i wybranych funkcji tego przyrządu.

5 Regulator LB-600 - funkcje specjalne

Regulator-sterownik LB-600 powstał w firmie LAB-EL w 2005r na podstawie założeń konstrukcyjnych autora pracy, w oparciu o wieloletnie doświadczenia w tworzeniu, aplikacjach i sprzedaży rodziny regulatorów EFTRONIK X. Jednostka centralna regulatora LB-600 zbudowana jest w oparciu o nowoczesny procesor 16-bitowy. Opis funkcji realizowanych przez regulator, nie jest przedmiotem niniejszej pracy, bardzo dokładny opis budowy, realizowanych funkcji, algorytmów i zaleceń montażowych można znaleźć w [WK1] i [OA1]. Regulator LB-600 łączy on w sobie właściwości wielofunkcyjnego regulatora PID z algorytmami zapewniającymi rozmaite typy regulacji oraz małego sterownika programowalnego, co

uzyskuje się poprzez odpowiednią konfigurację pakietów wejściowo-wyjściowych. Regulator LB-600 oprócz funkcji przynależnych do typowego regulatora, posiada cechy włączające go w rodzinę przyrządów produkowanych w firmie LAB-EL, dzięki możliwości podłączenia przyrządów poprzez łącze transmisji szeregowej S300.



Rys. 5.1 Ilustracja przedstawiająca przejmowanie sygnałów z różnych obszarów zastosowań.

Rys. 5.1 przedstawia ogólne możliwości regulatora LB-600 w aspekcie specyfiki sygnałów wejściowych i generowanych sterowań. Regulator-sterownik LB-600 oprócz funkcji podstawowych przypisanych do większości regulatorów, posiada dość bogatą bibliotekę funkcji, które nie są realizowane w wielu przyrządach tej klasy, produkowanych na świecie. Funkcje te zostały zaimplementowane w regulatorze w wyniku zebranych przez autora pracy, doświadczeń obiektowych w kraju i zagranicą oraz śledzenia potrzeb użytkowników autonomicznych systemów sterowania. Funkcje te dotyczą algorytmów regulacji, realizacji funkcji logicznych, alarmowych, funkcji definiowanych przez użytkownika, funkcji sterowania nadążnego oraz sterowania awaryjnego.

5.1 Funkcje specjalne

Doświadczenie systemów automatyzacji pokazuje, że tylko część zadań daje się zrealizować jako standardowe jednoobwodowe struktury układowe. Obiekty mogą charakteryzować się wieloma wielkościami wzajemnie na siebie oddziałującymi i trudno ogólnie wskazać jaka

struktura automatyki będzie zadowalająca. Opracowano i sprawdzono ich wiele; wykorzystuje się pomiary zakłóceń, różnych dodatkowych wielkości, stosuje się dodatkowe bloki dynamiczne, modele obiektów, układy kombinowane zamknięto-otwarte, regulatory z progresją parametrów dynamicznych itp.

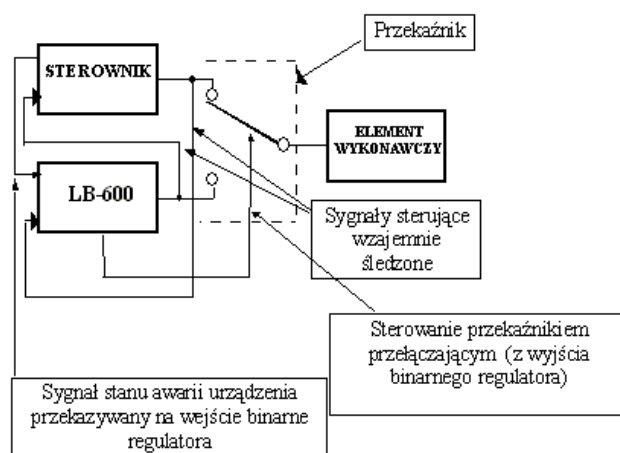
Dużych możliwości dostarczają nowoczesne rozwiązania aparatów mikroprocesorowych, szczególnie te o otwartej strukturze, czyli takie, w których do użytkownika należy zestawianie złożonych algorytmów z procedur bibliotecznych. Jest to jeden z trendów rozwoju aparatury sterowniczej. W początkach rozwoju trend ten zakładał dość duże obycie użytkowników z systemami automatyki – w trakcie konfiguracji sprzętu należało odpowiadać na niebanalne pytania i decydować o nie oczywistych z góry opcjach. Obecnie rozwinięte już zostały narzędzia (np. symulatory aparatów) pozwalające na łatwe konfigurowanie takiego sprzętu. Zatem, dzięki nowoczesnej aparaturze łatwa lub w ogóle możliwa jest nie tylko realizacja prostych funkcji dodatkowych jak alarmy, niektóre zmiany struktury, lecz także tych czyniących aparaty łatwiejszymi w użyciu (np. dzięki funkcji samostrojenia – autotuning), pewniejszymi w zastosowaniach przemysłowych (np. dzięki funkcji rezerwy – backup) lub umożliwiającymi rzadziej używane funkcje sterownicze (np. sterowania wyprzedzającego – feedforward). Dokonał się też ogromny rozwój teorii sterowania, a wiele nowych algorytmów sprawdzonych na modelach znalazło zastosowanie w opracowaniach różnych firm. Można tu wymienić zmodyfikowane algorytmy PID (np. wspomniane już – z progresją parametrów dynamicznych), regulację predykcyjną lub algorytmy rozmyte PID.

5.1.1 Regulacja w stanach awaryjnych – backup

W systemach automatyki różnej skali pewnym układom nadaje się wysoki priorytet – powinny zapewnić poprawne działanie systemu w zdefiniowanych sytuacjach awaryjnych. Aby zrealizować ten cel, projektanci stosują różne rozwiązania systemowe, np. dublowanie, redundancję sprzętową (nadmiar) wybranych elementów systemu, przełączenie na konfigurację dającą zadowalający bieg procesu z możliwym przejmowaniem wybranych funkcji przez inne aparaty lub programy. Wszelkie przewidywane przełączenia w systemie powinny się przy tym odbywać bezzderzeniowo, tzn. bez wywoływania skokowych zmian wartości wielkości sterujących (położenia elementu wykonawczego). W automatyce przemysłowej do realizowanego bezzderzeniowo przejścia do działania rezerwowego przylgnęła nazwa funkcji backup.

Przełączanie na funkcję rezerwy może się odbywać ręcznie lub automatycznie w reakcji na przewidziany do tego sygnał logiczny. Konstruktorzy muszą zadbać o możliwość bezzderzeniowego przełączenia na sterowanie awaryjne z dowolnego stanu pracy regulatora – trybu sterowania ręcznego (M), automatycznego (A) z lokalną i zewnętrzną wartością zadaną, a także bezzderzeniowy powrót do pierwotnego trybu pracy.

Realizacja funkcji rezerwy (backup) opiera się na stałym śledzeniu wielkości, która będzie wykorzystywana po przełączeniu, a w przypadku sygnału sterującego – na użyciu do jego wyznaczenia sygnału pochodzącego z tego samego elementu buforującego.

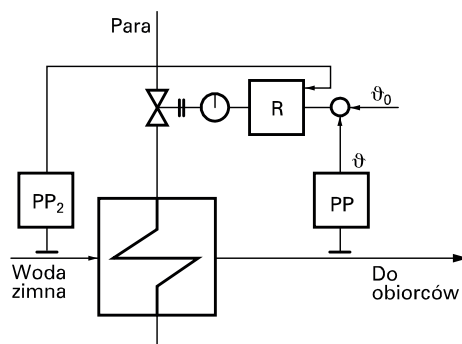


Rys. 5.2 Schemat poglądowy realizacji funkcji przełączania awaryjnego „backup”

Realizacja funkcji „backup” z wykorzystaniem regulatora LB-600, redundującego sterownik, z wzajemnym śledzeniem sygnałów sterujących przedstawia schemat poglądowy na rys. 5.2. Funkcja ta programowana jest w regulatorze, patrz opis w [OA1].

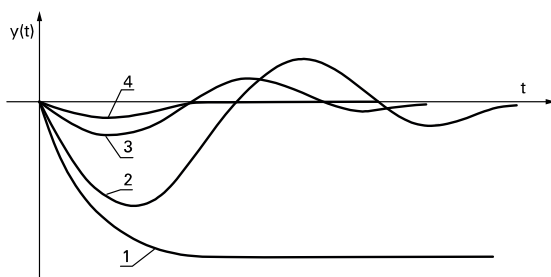
5.1.2 Regulacja wyprzedzeniowa – feedforward

W układzie ze sprzężeniem zwrotnym działanie sterujące wymaga wcześniejszego wyznaczenia wartości sygnału wyjściowego obiektu i uchybu regulacji. Uchyb jest wywołany zakłóceniami, których skutki objawiają się na wyjściu z opóźnieniem zależnym od miejsca ich oddziaływania na obiekt. W układzie z wymiennikiem ciepła z rys. 3.7b reakcja na zakłócenie wywołane zwiększonym poborem wody przez odbiorców i spowodowany przez to spadek temperatury rozpocznie się dopiero po stwierdzeniu zmian temperatury przez urządzenie pomiarowe PP_1 . Mimo zastosowania układu kaskadowego wahania temperatury będą większe niż wtedy, gdyby mierzyć przepływ wody zimnej i z wyprzedzeniem zwiększać otwarcie zaworu na dopływie pary, zanim zimna woda znajdzie się w strefie grzania. Przez odpowiedni dobór takiego oddziaływania można by skompensować wpływ zakłóceń. Opisany sposób stanowi istotę sterowania wyprzedzającego (feedforward). Na rys. 5.3 pokazany jest przykładowy układ sterowania wyprzedzającego.

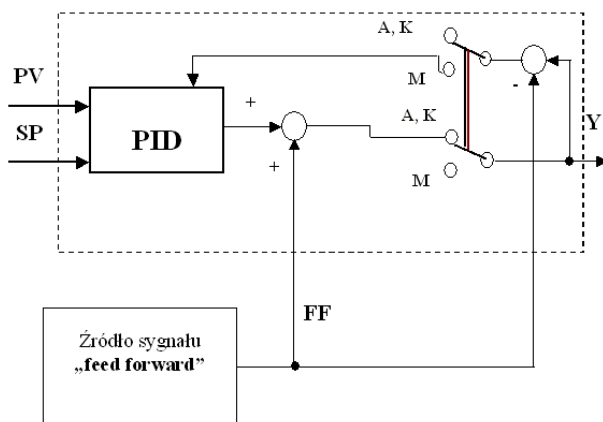


Rys. 5.3 Przykładowy układ sterowania wyprzedzającego (feedforward)

Gdy regulator R (dysponujący dodatkowym wejściem) jest proporcjonalny, mówi się o układzie statycznym. Oczywiście, do przetwarzania sygnału z toru pomiarowego PP₂ można użyć w regulatorze członów/algorytmów przyspieszających fazę i przez to kompensujących dynamikę początkowej części obiektu. Taki układ nazywa się wtedy dynamicznym układem sterowania wyprzedzającego (feedforward). Porównanie możliwych skutków rozmaitych wariantów sterowania jest pokazane na rys. 5.4.



Rys. 5.4 Porównanie możliwych skutków różnych rodzajów sterowania po zakłóceniu skokowym: 1) bez użycia regulatora; 2) po zastosowaniu regulatora PID; 3) w układzie statycznego sterowania wyprzedzającego (feedforward); 4) w układzie dynamicznego sterowania wyprzedzającego.

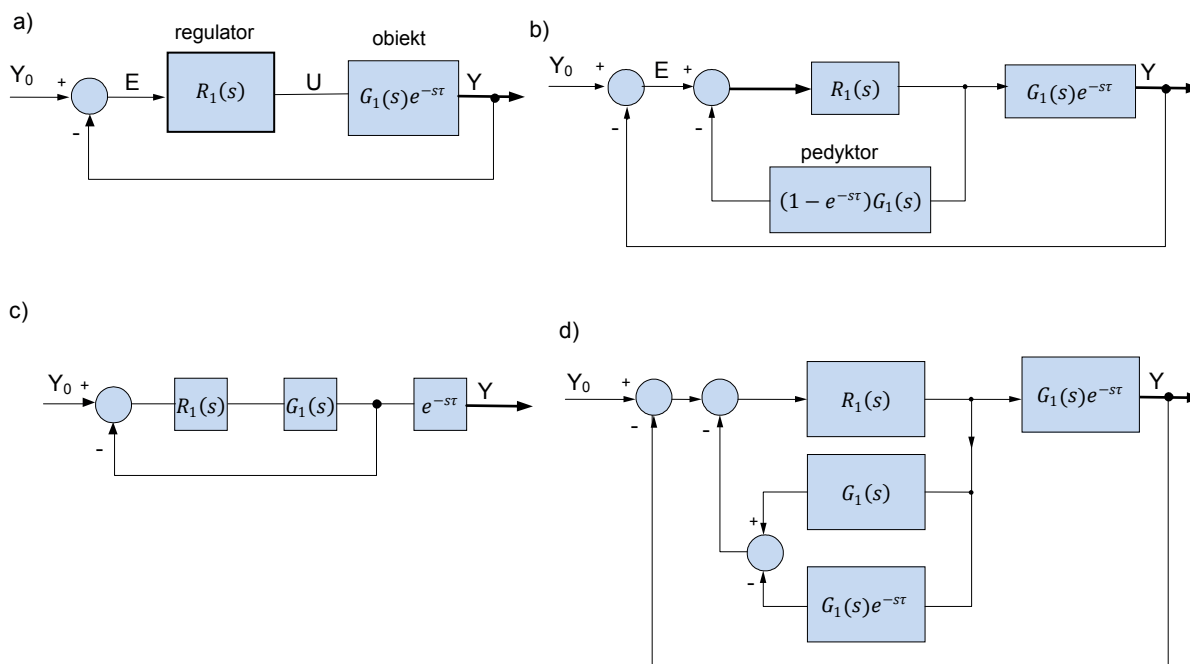


Rys. 5.5 Schemat blokowy przedstawiający realizację funkcji „feedforward” przez regulator LB-600.

Na rys. 5.5 przedstawiono schemat realizacji funkcji „feedforward”. Sygnał FF generowany przez źródło sygnału sprzężenia „feedforward” (może to być dowolny sygnał, z dowolnego miejsca w regulowanym procesie jak i sygnał wypracowany wewnątrz regulatora), dodawany jest do sygnału wyjściowego z regulatora PID, co w przypadku pracy regulatora w trybach „A” i/lub „K” (Automatyka/Kaskada) daje sygnał sterujący Y . Równocześnie sygnał FF odejmowany jest od sygnału sterującego Y po to, aby po przełączeniu regulatora w tryb pracy „M” (Ręczny), nie następował skok o wartość FF, lecz aby regulator pozostawał z sygnałem jakby nie było sprzężenia „feedforward”.

5.1.3 Regulacja predykcyjna

Spore kłopoty z uzyskaniem dostatecznej jakości regulacji przy użyciu zwykłych regulatorów PID sprawiają obiekty charakteryzujące się czystym opóźnieniem transportowym o znacznej wartości. Wraz z rozwojem możliwości obliczeniowych układów mikroprocesorowych realny stał się powrót do pomysłu Smitha z lat 50-tych XX w. użycia układu kompensującego skutki opóźnienia w obiekcie, zwanego predyktorem Smitha. Według tego pomysłu proponuje się modyfikację układu regulacji w sposób pokazany na rys. 5.6b, czyli użycie zmodyfikowanego regulatora zawierającego człon ujemnego sprzężenia zwrotnego, którego parametry dynamiczne przyjmują wartości równe parametrom obiektu.



Rys. 5.6 Zastosowanie predyktora Smitha w układzie regulacji z obiektem o dużym opóźnieniu: a) układ klasyczny; b) układ zmodyfikowany z predyktorem; c) przekształcony układ równoważny; d) inna postać układu ze zmodyfikowanym regulatorem

Pierwotny obiekt (rys. 5.6a) jest niewątpliwie trudny do regulacji z powodu występowania opóźnienia w pętli sprzężenia zwrotnego. Wykorzystując zasady algebry schematów blokowych do układu z rys. 5.6b, po niewielu przekształceniach otrzymujemy wzór na transmitancję układu zamkniętego w postaci:

$$\frac{Y(s)}{Y_0(s)} = \frac{R_1(s)G_1(s)e^{-st}}{1 + R_1(s)G_1(s)}$$

Jest to transmitancja układu zamkniętego przedstawionego na rys. 5.6c. Widać, że bloki tworzące strukturę z ujemnym sprzężeniem zwrotnym nie zawierają opóźnienia, które znalazło się poza pętlą sprzężenia. W strukturze z rys. 5.6c opóźnienie nie wpływa na stabilność, ani na dokładność układu regulacji – wymagania odnoszące się do tych zagadnień są tu łatwiejsze do spełnienia niż w układzie z rys. 5.6a, ponieważ śmielej można zwiększać wzmocnienie regulatora poprawiając przez to dokładność.

Na rys. 5.6d pokazana została struktura z rys. 5.6b w równoważnej, przekształconej postaci. Na jej podstawie widać siłę, ale i słabości tej postaci regulatora predykcyjnego. Jednoczesne występowanie pętli ujemnego i dodatniego sprzężenia zwrotnego wokół regulatora R_1 oraz wymaganie użycia dokładnego modelu obiektu w postaci G_1 i e^{-st} czyni z takiej kompensacji skutków opóźnienia bardzo trudne zadanie. Odtworzenie w predyktorze części G_1 nie jest skomplikowane (uwarunkowane jednak dokładną identyfikacją); zamiast czystego opóźnienia można jednak zrealizować zaledwie jego aproksymację.

Nie bez powodu pomysł regulatora predykcyjnego tak długo czekał na realizację. Trzeba bowiem dostrzec, że jego wersja ciągła, co sugeruje zapis w postaci transmitancji operatorowej, czyni z niego bardzo niepewne narzędzie automatyzacji, aczkolwiek przy sterowaniu pewnymi procesami, narzędzie to może wydać się bardzo przydatne.

Nowe możliwości obliczeniowe układów mikroprocesorowych, dają konstruktorom algorytmów wiele korzyści, głównie z uwagi na duże pojemności pamięci oraz małe czasy przetwarzania T_p , zwane okresem próbkowania, czasem obiegu pętli, itp. Warto zwrócić uwagę, że wyznaczenie sterowania według jakiegokolwiek algorytmu cyfrowego odbywa się w skończonym czasie, zatem interwencja regulatora nie może się odbywać częściej niż wynosi czas obliczania sterowania. W praktyce rzadkie są przypadki zbliżania się do tego ograniczenia, wszakże zawsze przyjmuje się czas T_p , który służąc jako najmniejszy kwant czasu pozwala posługiwać się ciągami liczbowymi $k(nT_p)$, $n= 1, 2, 3,..$ jako reprezentacją funkcji ciągłej $k(t)$. Wartość funkcji $k(t)$ wewnątrz przedziału $[nT_p, (n+1)T_p]$ zależy od sposobu ekstrapolacji. Posługiwanie się modelami dyskretnymi układów dynamicznych w obliczeniach komputerowych jest zatem oczywiste.

Mając zaś model procesu ze wszystkimi jego ograniczeniami technicznymi, a także dysponując szybkimi narzędziami obliczeniowymi, można wyznaczyć sterowanie zapewniające realizację celu (sterowanie docelowe), charakteryzujące się konkretną wartością wskaźnika jakości – przy pełnej świadomości tego, że jest to sterowanie przewidywane (predykowane) na

czas, który ma nadejść, zatem jego wartość (w sensie praktycznej przydatności i oceny według standardowych wskaźników jakości) będzie malała w miarę upływu czasu od chwili, kiedy to sterowanie było obliczone. Istnieją jednak możliwości poprawiania tego sterowania. Jedną z nich, opartą na zasadzie przesuwanego horyzontu można krótko przedstawić następująco:

- korzystając z modelu procesu należy wyznaczyć sterowanie docelowe na kilka okresów T_p w przód (wprowadza się pojęcie horyzontu sterowania wyrażającego liczbę tych okresów),
- obliczone sterowanie używa się do sterowania rzeczywistym procesem, jednak nie w całym horyzoncie sterowania, lecz tylko przez okres T_p , po zakończeniu którego można wyznaczyć różnicę skutków użycia tego sterowania w procesie i w modelu (błąd),
- wyznaczony błąd, wraz z modelem, jest używany w kolejnej iteracji do wyznaczenia sterowania docelowego na nowy, przesunięty w czasie o okres T_p , horyzont sterowania,
- itd.

Pojawienie się niezerowego błędu wynika z niedokładności modelu procesu, może też być wywołane niemierzalnymi zakłóceniami, jednakże użycie błędu do wyznaczania sterowania wskazuje na obecność w układzie dyskretnego sprzężenia zwrotnego.

Jasne i formalnie poprawne przedstawienie w krótkim wywodzie zagadnień związanych z regulacją predykcyjną wykracza poza możliwości niniejszego opracowania, istnieje zresztą na ten temat bardzo obszerna literatura (np.[15]). Warto jeszcze wprowadzić niektóre pojęcia i wskazać czynniki natury teoretycznej i praktycznej rzutujące na postać algorytmów regulacji predykcyjnej.

Horyzont predykcji wyznaczony jest przedziałem czasu (liczbą iteracji algorytmu), dla którego dokonuje się obliczeń trajektorii. Przyjmuje się, że horyzont predykcji jest dłuższy od horyzontu sterowania. W kolejnych iteracjach oba horyzonty ulegają przesunięciu zachowując długość.

Ponieważ wyznaczanie predykowanego wyjścia procesu odbywa się na podstawie jego modelu (dla układu otwartego), to możliwe jest uwzględnienie wszystkich właściwości procesu, które w tym modelu zostały zawarte, takich jak nieliniowości, sprzężenia skrośne dla obiektów o wielu wejściach i wielu wyjściach, ograniczenia sygnałów wyjściowych itp. Również w naturalny sposób daje się uwzględnić ograniczenia sygnałów sterujących. Jak dotąd, największe znaczenie mają algorytmy z liniowymi modelami obiektów. Znajdują zastosowanie również algorytmy z modelami nieliniowymi zlinearyzowanymi. Istotne znaczenie ma również forma matematyczna używanych modeli obiektu; najczęściej stosowane są modele oparte na odpowiedzi skokowej, wykorzystuje się też dyskretne równania różnicowe.

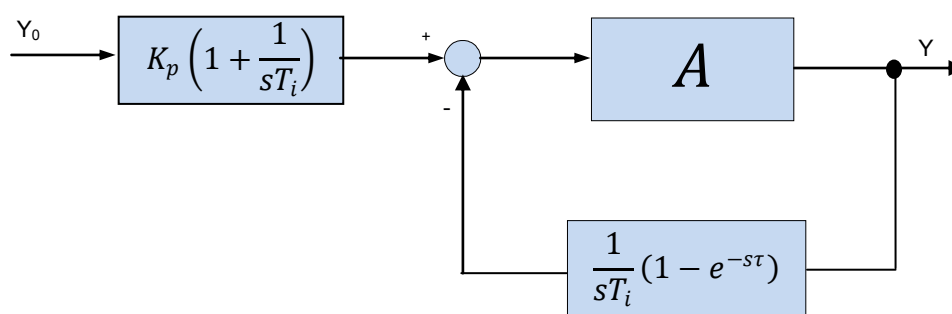
Sterowanie obliczane jest pod kątem minimalizacji wskaźnika jakości uwzględniającego różnice między przewidywanymi na początku okresu predykcji wartościami wyjść obiektu, a wartościami zadanymi dla tych wyjść (na horyzoncie predykcji). Do tzw. funkcji kryterialnej określającej jakość regulacji na horyzoncie predykcji, wprowadza się też zwykle karę za zmiany w kolejnych iteracjach wartości sterowań. Najczęściej przyjmuje się w tym miejscu kwadratową formę funkcji kryterialnej.

Istotnym elementem modelu procesu są zakłócenia; ich szczególna postać (estymacja) będzie mieć wpływ na postać algorytmu. Przy pewnych zadaniach może pojawić się matematyczny problem istnienia (a praktycznie braku) rozwiązania dopuszczalnego. Występuje też teoretyczny problem stabilności algorytmów predykcyjnych; zwykły użytkownik, mający do czynienia z gotowym sprzętem jest przed tym problemem chroniony.

Na podstawie przedstawionego szkicu i listy (niepełnej) zagadnień dotyczących regulacji predykcyjnej widać ogromną ilość zadań cząstkowych, które muszą być rozwiązane w każdej iteracji. Szybkość obliczeń, osiągnięta dzięki nowym narzędziom sprzętowym i programowym, pozwala na tyle skrócić okres T_p i odstęp między interwencjami regulatora w proces, że stało się możliwe jego użycie w warstwie regulacji systemu automatyki i uzyskanie poprawy jakości sterowania w porównaniu z zastosowaniem konwencjonalnych regulatorów PID. Wiele firm ma już w swojej ofercie regulatory predykcyjne.

Należy jednak podkreślić rolę jakości modelu procesu; gdy zastosowany zostanie niedokładny model, to trudno spodziewać się poprawy jakości regulacji przez predykcję.

Mimo widocznych słabych stron regulator predykcyjny ma bogatą literaturę i w wielu miejscach jest cytowana np. "bardziej praktyczna" struktura PIR (PI Retard – nazwa podkreślająca opóźnienie, zwalnianie) pokazana na rys.5.7.



Rys. 5.7 Schemat blokowy algorytmu PIR zaimplementowany w regulatorze LB-600

Na rys. 5.7 przedstawiona została fizyczna realizacja algorytmu PIR w regulatorze LB-600. Regulator PI realizuje sterowanie bądź przy włączonym predyktorze gdy $A = 1$, bądź też przy wyłączonym, gdy $A = 0$. Opóźnienie τ występujące w bloku predyktora, otrzymywane jest automatycznie po przeprowadzeniu procedury samostrojzenia.

Pewna modyfikacja algorytmu predykcyjnego uwzględniająca czasowy horyzont predykcji oraz sterowania, przedstawiona jest w pracy [PD2].

5.1.4 Regulacja PID Fuzzy logic

5.1.4.1 Wprowadzenie do logiki rozmytej (Fuzzy Logic)

Algorytmy, którymi posługują się ludzie (nawet nieświadomie !) w codziennym życiu, w swej przeważającej części mieszczą się bardziej w obszarze określanym od niedawna nazwą logiki rozmytej (fuzzy logic) niż w obszarze logiki klasycznej. [WK11], [WK1] i [AP5].

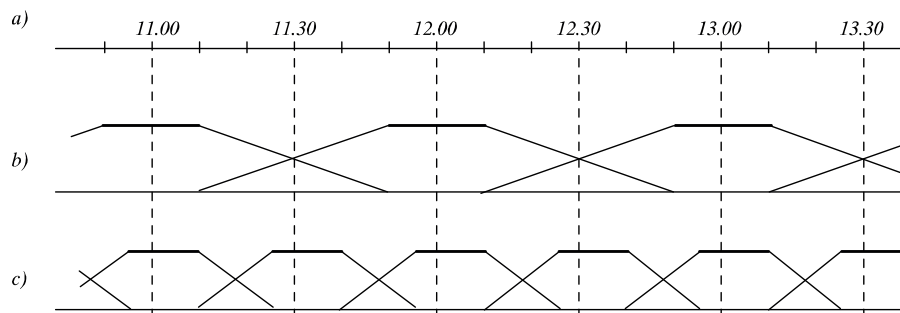
Działanie wielu układów technicznych bardzo wygodnie jest opisywać zdaniami orzekającymi – prostymi lub złożonymi warunkowymi. Zarówno o warunkach jak i o wartości logicznej całych zdań można wtedy powiedzieć, że są prawdziwe lub fałszywe. Są to kategorie logiki klasycznej. Panuje w niej pełny rygorizm klasyfikacji (np. że coś spełnia lub nie spełnia warunku) oraz orzekania prawdziwości zdań; opracowano reguły poprawnego wnioskowania, automatycznego dowodzenia twierdzeń itp. Do opisu, analizy i projektowania układów działających według zasad tej logiki stworzono specjalny zapis formalny, języki i procedury projektowania. Przykładami takich układów mogą być urządzenia dozujące i pakujące towary oraz sterujące nimi automaty: wykonanie przez nie elementarnej czynności lub przejście do następnego kroku jest uwarunkowane spełnieniem ściśle określonych warunków.

Przy wypracowaniu syntetycznego wskaźnika oceny jakości procesu uwzględnia się niekiedy wiele czynników mających cechy wiedzy eksperckiej. Na przykład o otwarciu lotniska do przyjmowania samolotów decydują takie czynniki jak podstawa chmur, stan pasów startowych, prędkość i kierunek wiatru, rodzaj urządzeń do kierowania lotem – i żadnego z nich nie można sklasyfikować według ostrych kryteriów: prawda – fałsz, dobry – zły, odpowiedni – nieodpowiedni. Do oceny będzie używana raczej klasyfikacja: warunki łatwe – średnie – ciężkie, bez przyjmowania ostrych granic między nimi. Podobnie, przy kierowaniu samochodem w trudnych warunkach, przyjęcie określonej prędkości podróźnej, odstępu między pojazdami lub podjęcie decyzji o rozpoczęciu manewru wyprzedzania nie da się opisać algorytmem zależnym od dwuwartościowej oceny kilku parametrów jazdy. I znowu – przed decyzją o rozpoczęciu wyprzedzania będą analizowane takie czynniki jak zakres widoczności przed pojazdem wyprzedzanym (mały – średni – duży?), dysponowana przewaga prędkości (mała – średnia – duża?), odległość do miejsca, w którym konieczne będzie rozpoczęcie hamowania (mała, np. skutkująca zajeżdżaniem innemu użytkownikowi drogi tuż przed światłami – średnia – duża). W tym przypadku dwuwartościowa decyzja o podjęciu wyprzedzania zależy od nieostrej klasyfikacji parametrów jazdy.

Warto zauważyć, że dla dobrej charakteryzacji procesu może zachodzić potrzeba wyróżnienia większej niż dotąd liczby zbiorów. Na przykład oceniając przewagę prędkości przy wyprzedzaniu można mówić o bardzo małej, małej, średniej, dość dużej i bardzo dużej przewadze prędkości. Zbiory tych prędkości są rozłączne, ale ponieważ nie mają ostrych granic

(są rozmyte), to w procesie przypisywania wartości prędkości do określonego zbioru (ogólnie – wartości opisującej daną cechę) korzysta się (lub tworzy się) tzw. funkcje przynależności, których wartości mają sens współczynników określających względny stopień powiązania elementu ze zbiorem. Stopień tego powiązania maleje wraz ze wzrostem "odległości" od pewnej wartości średniej, charakteryzującej zbiór.

Sens funkcji przynależności i sposobu jej tworzenia można prosto zilustrować przykładem dokumentowania zjawiska meteorologicznego zachodzącego w czasie odmierzonym dokładnym zegarkiem, z możliwością odnotowania go na arkuszu w rubrykach opisanych pełnymi godzinami. Zależnie od charakteru zjawiska można ustalić przedziały czasu wokół pełnych godzin (np. -10min....+10min.) takie, że będzie zgoda na charakteryzację wydarzenia godziną stanowiącą środek przedziału. Aby nie tracić z pola widzenia zdarzeń dziejących się w przedziale $[n+10, (n+1)-10]$, gdzie n oznacza pełną godzinę zegarową, można się umówić na przypisywanie chwili zdarzenia do obu sąsiednich zbiorów, jednak nie bezwzględnie, lecz ze współczynnikami wagi $k(n)$ (zwanymi funkcjami przynależności) malejącymi ze wzrostem różnicy czasów liczonej względem nominalnego środka; obraz funkcji przynależności daje wykres b) na rys. 5.8.



Rys. 5.8 Ilustracja pojęcia zbiorów rozmytych i funkcji przynależności:

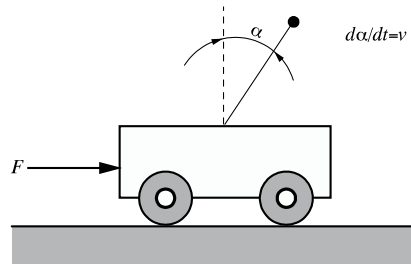
- a) oś zdarzeń; b) zbiory „pełnych godzin” z symetrycznymi funkcjami przynależności;
c) „zbiory połówek godzin” z niesymetrycznymi funkcjami przynależności

Zdarzenia dziejące się około godziny 11.30 można przypisać zarówno do godz. 11 jak i 12 ze współczynnikami wagi $1/2$. Zaś zdarzenie z godz.11.20 przypisuje się do godz.11 ze współczynnikiem wagi $0,75$ i do godz.12 ze współczynnikiem $0,25$. Z opisu zadania technicznego może wynikać potrzeba innego podziału na podzbiory – np. tak jak zostało pokazane na rys. 5.8c. Kształty funkcji przynależności nie muszą być symetryczne. W problemach dotyczących zagadnień sterowania przyjmuje się, że suma wartości funkcji przynależności do sąsiednich zbiorów jest równa 1.

Ta nieostrość granic zbiorów, którym przypisuje się określone klasyfikacje wymaga innego podejścia do problemów sterowania, a także przyjmowania kategorii logiki rozmytej (fuzzy logic). Te kategorie, to m.in. rozmywanie zbiorów (fuzzyfikacja), wnioskowanie (defuzzyfikacja) i wyostanie decyzji.

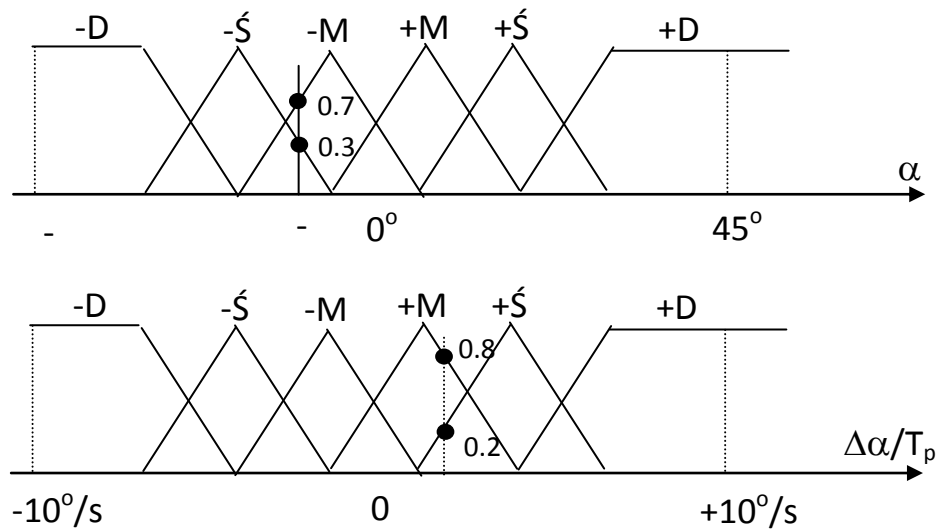
Operacja podziału na zbiory rozmyte i przypisania zbiorom funkcji przynależności nazywa się kodowaniem lingwistycznym lub, popularnie, fuzyfikacją.

Wygodnie będzie prześledzić to na przykładzie.



Rys. 5.9 Schemat wahadła odwróconego

Na rys. 5.9 przedstawiony jest schemat tzw. wahadła odwróconego. Pręt z umieszczonym na końcu ciężarkiem jest połączony z wózkiem przegubowo i może się odchyłać od pionu o kąt α w płaszczyźnie rysunku. Działając na wózek siłą F dobraną pod względem wartości i zwrotu można utrzymywać wahadło w pozycji pionowej (jak na rysunku) mimo obecności zakłóceń i strukturalnej niestabilności takiego obiektu. Czytelnicy tego opracowania z pewnością znają z własnego doświadczenia (zabawa utrzymywania patyka na palcu) główne cechy tego rozwiązania, które może być też wyznaczone automatycznie, ponieważ można łatwo zmierzyć oznaczony na rysunku kąt odchylenia od pionu α oraz prędkość $\frac{d\alpha}{dt}$



Rys. 5.10 Wynik kodowania lingwistycznego dla wahadła odwróconego

Wiedzę o obiekcie wyprowadzoną z jego analizy matematycznej (lub zdobytą na podstawie doświadczenia) można zawrzeć w obrazie kodowania lingwistycznego pokazanym na rys. 5.9; wynika z niego, że dla odchylenia α przyjęto sześć zbiorów: dodatnie – małe (M), – średnie (Ś), – duże (D) oraz ujemne – małe (-M), ..., z trójkątnymi funkcjami przynależności. Podobnie dla prędkości $\frac{d\alpha}{dt}$. W przypadku tego obiektu przedstawiony opis jest wystarczający.

Opis ten pozwala na przyjęcie reguł sterowania o postaci:

jeżeli $\alpha = \alpha_1$ **i** $v = v_1$ **to** $F = F_1$ **(if ... then ...)**

lub o postaci bardziej złożonej – odpowiednio do sposobu działania obiektu. Ta właściwa dla logiki klasycznej postać reguł wyraża prawa sterowania dla dyskretnych wartości położenia i prędkości. Ze względu na sposób dokonanej fuzyfikacji reguł sterowania jest 36. Pokazuje to podstawowy opis tablicy decyzyjnej pokazanej na rys. 5.11.

Tablica decyzyjna

6*6 = 36 reguł “if ... then”

		α					
		-D	-Ś	-M	+M	+Ś	+D
$\Delta\alpha/T_p$	-D	-D	-D	-D	-Ś	-M	-M
	-Ś	-D	-D	-Ś	-M	-M	+M
	-M	-Ś	-Ś	-M	-M	+M	+Ś
	+M	-Ś	-M	+M	+M	+Ś	+D
	+Ś	-M	+M	+M	+Ś	+D	+D
	+D	+M	+M	+Ś	+D	+D	+D

Rys. 5.11 Zapis reguł sterowania wahadła odwróconego w postaci tablicy decyzyjnej

Położenie i prędkość wahadła (α i v) zmieniają się w sposób ciągły określając odcięte na rys. 5.10. Korzystając z funkcji przynależności można wyznaczyć nieostre decyzje sterowania obiektem; jest to wyznaczanie konkluzji (wniosków) dotyczących prostych reguł. Dla przyjętych przykładowo wartości $\alpha = -11^\circ$ i $v = +2^\circ/s$ z rzędnych można ocenić, w jakim obszarze tablicy decyzyjnej będzie znajdowało się sterowanie; interesujące pola są zaciemnione. Ten etap wyznaczania sterowania nazywa się wnioskowaniem lub defuzyfikacją.

Nie oznacza to końca wyznaczania sterowania. Niezbędne jest połączenie konkluzji wynikających ze wszystkich reguł. Rzut oka na tablicę decyzyjną pokazuje, że trzeba dodatkowego

algorytmu “uściślającego” wartość sterowania. Przecież nawet przyjęcie wartości sił odpowiadających małym, średnim oraz dużym uchybom (odpowiednio – F_M , F_S , F_D), sił mających istotny wpływ na właściwości układu, wymaga specjalnego przeanalizowania. W omawianej sytuacji najbardziej prawdopodobne jest użycie siły F_{+M} . Jeżeli jednak wykorzystać współczynniki wagi wynikające z funkcji przynależności względem α , to należy przyjmować

$$F = 0,3F_{-M} + 0,7F_{+M}$$

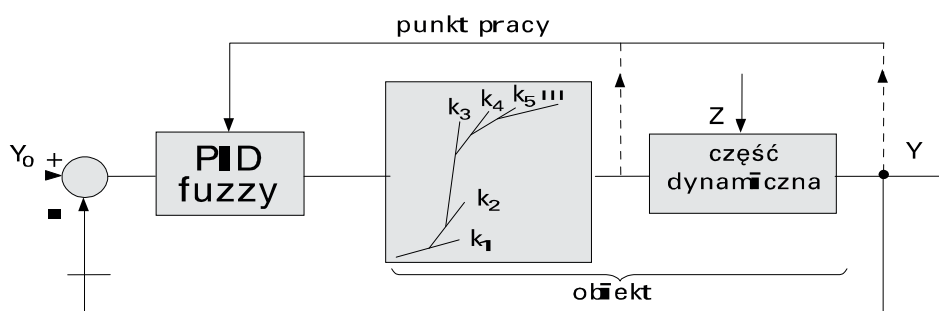
W kolejnym etapie wyznaczania sterowania ważne jest uwzględnienie wpływu prędkości v , można sobie bowiem wyobrazić sytuację (wywołaną zakłóceniami) różnych wartości liczbowych prędkości v przy jednakowej wartości odchylenia α . Wyznaczanie wartości liczbowych zmiennych sterujących określa się terminem wyostrzania decyzji (defuzyfikacji).

Modele rozmyte o podanej szkieletowo strukturze nazywa się modelami Takagi-Sugeno

5.1.4.2 Regulacja obiektów nieliniowych (PID Fuzzy)

Wiele procesów przemysłowych wykazuje charakter nieliniowy, a specyfika ich eksploatacji narzuca zmianę punktu pracy w szerokim zakresie. Konwencjonalne regulatory PID z jednym kompletem nastaw dynamicznych nie mogą wtedy spełnić swego zadania i zapewnić odpowiedniej jakości przy zadaniu kompensacji zakłóceń. Przy silnej nieliniowości obiektu i dużych zmianach punktów pracy, dobranie nastaw może być w ogóle niemożliwe, ponieważ wartości dobre dla jednego mogą powodować niestabilność dla innego punktu pracy. Pierwsze rozwiązania układowe wychodzące naprzeciw potrzebom praktyki sprowadzały się do oferty regulatorów z przełączanymi w trakcie pracy komplectami nastaw; zaspokajało to część potrzeb.

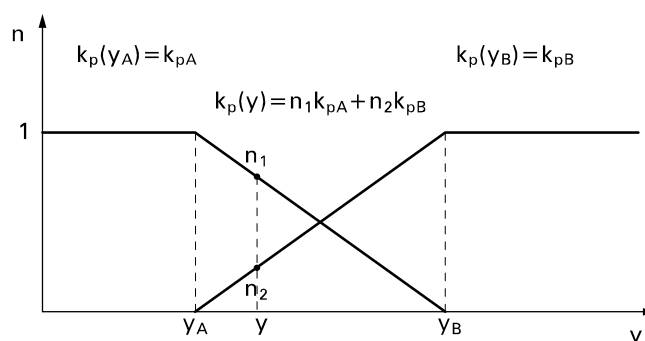
Nieliniowości obiektu regulacji najczęściej są umiejscowione w części statycznej. Objawiają się wtedy zmianami zastępczego wzmocnienia obiektu. W przypadku, gdy można określić aktualny punkt pracy układu nieliniowego, a dla stabilnego układu regulacji z umiarkowanymi zakłóceniami położenie to może określać wartość średnia wielkości regulowanej y , znajdują zastosowanie algorytmy PID Fuzzy polegające na stworzeniu tablicy n kompletów nastaw regulatora i odpowiedniego korzystania z nich (rys. 5.12).



Rys. 5.12 Nieliniowy układ regulacji z regulatorem PID Fuzzy

Liczba n nie musi być duża, jest cechą konstrukcji aparatu i zwykle nie przekracza kilkunastu. Każdy z kompletów odpowiada innemu punktowi pracy na nieliniowej charakterystyce obiektu. Sposób rozmieszczenia wybranych n punktów na charakterystyce zależy od użytkownika, powinien pokrywać cały zakres zmian y z uwzględnieniem charakteru nieliniowości obiektu, tzn. punkty powinny zagęszczać się w obszarach większych zmian wzmocnienia obiektu.

Dalsze wykorzystanie w regulatorze przygotowanych nastaw nie polega na prostym przełączaniu na kolejne zestawy wraz ze zmianą wielkości wyjściowej obiektu, lecz na wyznaczeniu obowiązującego w danej chwili, nowego kompletu nastaw, z uwzględnieniem nastaw właściwych dla sąsiednich punktów pracy. Do obliczeń wykorzystuje się techniki opracowane w teorii zbiorów rozmytych. Wyjaśnienie sposobu obliczania aktualnych wartości parametrów regulatora, na przykładzie współczynnika wzmocnienia k_p , można prześledzić na rys. 5.13



Rys. 5.13 Funkcje przynależności i wyznaczanie współczynników wagi dla obliczenia bieżącego parametru regulatora

Przypuśćmy, że dla małych odchyłeń wielkości regulowanej y od wartości y_A układ regulacji działa poprawnie, jeśli w równaniu regulatora współczynnik $k_p = k_{pA}$. Podobnie, dla małych odchyłeń y od punktu y_B powinien w równaniu regulatora występować współczynnik $k_p = k_{pB}$. Jeśli w pewnej chwili wielkość regulowana przyjmie wartość y leżącą między punktami y_A i y_B , to intuicyjnie jest zrozumiałe, że najbardziej odpowiednią wartość współczynnika k_p nie będzie równa k_A ani k_{pB} , lecz będzie jakaś pośrednia, zawarta między k_{pA} i k_{pB} . Przy braku przekonujących argumentów za innym doбором obszarów przynależności, rozsądnie jest przyjąć takie relacje między obszarami przynależności do punktów y_A oraz y_B jak zostały pokazane na rys. 5.13 (trójkątne funkcje przynależności) oraz współczynniki przynależności o wartościach różnych od zera w całym przedziale (y_A, y_B) . Tak więc dla pośredniej wartości sygnału wyjściowego $y_A < y < y_B$ wartość współczynnika wzmocnienia dla regulatora oblicza się ze wzoru

$$k_p = n_1 k_{pA} + n_2 k_{pB}$$

Takie same wzory obowiązują przy wyznaczaniu czasu zdwojenia T_i i stałej czasowej różniczkowania T_d .

Zadanie skompletowania nastaw dla regulatora PID Fuzzy odpowiadających różnym wybranym punktom należącym do zakresu sterowania y najłatwiej jest wykonać przy użyciu regulatora dysponującego funkcją samostrojenia (autotuning). Znane rozwiązania takich regulatorów mają opcję pokazywania do akceptacji dobranych nastaw, należy więc je tylko zanotować. Wysiłek użytkownika systemu sprowadza się wtedy do przemyślanego wyboru punktów pracy i starannego przeprowadzenia eksperymentu samostrojenia. Można oczywiście wykorzystać nastawy odpowiadające różnym punktom pracy uzyskane w czasie innych eksperymentów lub nastawy zebrane podczas wcześniejszej eksploatacji obiektu.

5.1.4.3 Specyfika regulatora LB-600 w realizacji algorytmów PID Fuzzy

Tam, gdzie obiekt wykazuje znaczne nieliniowości, a użytkownik potrafi je określić w sensie przypisania różnym punktom pracy różniących się parametrów regulatora PID, można użyć regulatora LB-600 z algorytmem PID Fuzzy. W regulatorze zdefiniowana jest tablica zbudowana z 400 elementów, każdy z elementów tablicy zawiera 5 komórek pamięci. Tablice mają charakter uniwersalny, to znaczy że wiele różnych funkcji można realizować przy ich wykorzystaniu. Algorytm PID Fuzzy zajmuje 4 komórki pamięci, gdzie zapisuje się parametry PID dla poszczególnych punktów pracy. Każdy zestaw nastaw PID zawiera:

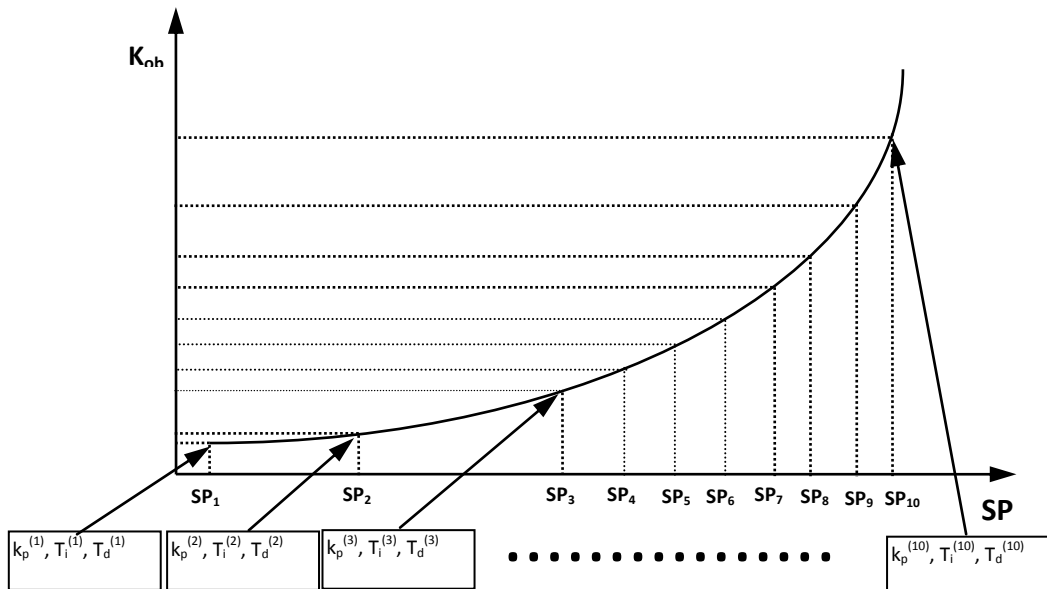
- wartość zadaną SP_n określającą punkt pracy n ,
- współczynnik wzmocnienia k_{pn} dla punktu pracy n ,
- czas zdwojenia (całkowania) T_{in} dla punktu pracy n ,
- czas wyprzedzenia (różniczkowania) T_{dn} dla punktu pracy n .

Zestaw parametrów dla poszczególnych punktów pracy można nazwać regulatorem lokalnym w danym punkcie pracy. Realizacja funkcji PID Fuzzy w poszczególnych kanałach regulatora polega na wpisaniu dla danego kanału adresu początku tablicy, np. kanał pierwszy zajmuje komórki od adresu 1 do 49, drugi od 50, itp. przy czym używanie adresów jest dowolne, ale musi być świadome, aby kanały regulatora nie pobierały parametrów z tablic przypisanych innym kanałom. Przy symetrycznym rozłożeniu adresów, dla 8 kanałów regulatora, każdy nich może dysponować 50 elementami tablicy. Bazując na [WK1] i [AP5] można zreasumować, że każdy kanał regulacji może obsłużyć do 50 lokalnych regulatorów PID, a granicznym przypadkiem jeden kanał regulatora może obsłużyć aż 400 regulatorów lokalnych. Nastawy dla poszczególnych punktów pracy (dla danego procesu regulacji) mogą być wprowadzane ręcznie w trybie programowania lub jako przesyłka (całej tablicy) w trybie transmisyjnym. Określenie poszczególnych zestawów nastaw PID dla danego procesu może być realizowane w sposób empiryczny przez użytkownika znającego jego właściwości lub przez zbieranie nastaw określanych np. przez algorytm samostrojenia regulatora LB-600 pełniącego rolę identyfikatora procesu.

Jeśli właściwości dynamiczne nieliniowego procesu zależą od ustawianej wartości zadanej SP, wówczas dla scharakteryzowania dynamiki regulowanego nieliniowego obiektu można

posłużyć się zbiorem od kilku do kilkudziesięciu zestawów (k_p, T_i, T_d) nastaw tzw. lokalnych regulatorów PID, przy czym każdy zestaw nastaw powinien zapewniać odpowiednią regulację w małym otoczeniu danej wartości zadanej SP (otoczeniu danego punktu pracy). Te zestawy nastaw lokalnych regulatorów PID, nazwane zestawem parametrów identyfikacyjnych, należy określić dla różnych wartości zadanych SP.

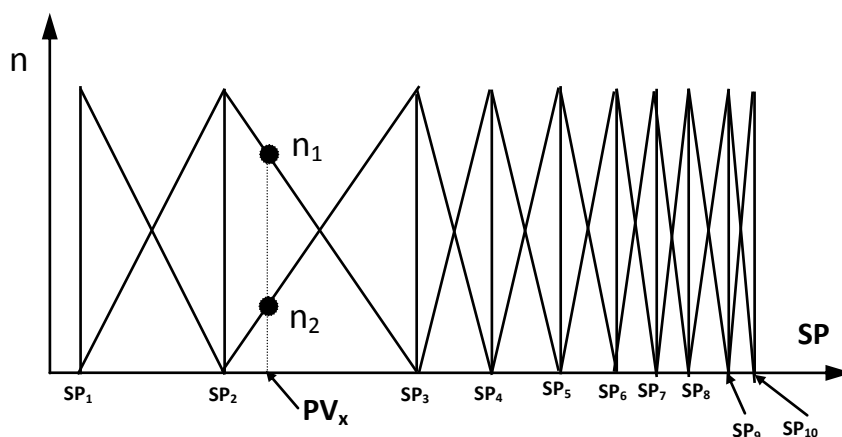
Na rys. 5.14 zamieszczono przykładową charakterystykę wzmocnienia nieliniowego układu regulacji w funkcji wartości zadanej SP. W kolejnych punktach SP_i należy uzyskać zbiór nastaw k_p^i, T_i^i, T_d^i wraz z odpowiednią dla nich wartością SP_i . Należy zauważyć, że punkty SP_i nie są rozłożone równomiernie, lecz zagęszczają się w obszarze wzrostu nachylenia omawianej charakterystyki. W tym sensie, właściwości dynamiczne rozpatrywanego nieliniowego obiektu mogą być scharakteryzowane nie tylko za pomocą zbioru stałych czasowych, współczynników wzmocnień itp. lecz również za pomocą zbioru nastaw lokalnych regulatorów PID. Dla uproszczenia przyjęto 10 punktów pracy, uzyskując dziesięcioelementową tablicę nastaw.



Rys. 5.14 Przykładowa zależność wzmocnienia k_0 od punktu pracy SP dla nieliniowego obiektu regulacji.

Odcinek od SP_1 do SP_{15} wyznacza obszar zmian wartości zadanej SP.

Sposób obliczeń parametrów wyjaśniono na rys. 5.15, na którym przedstawiono tzw. funkcje przynależności odpowiadające zakresowi wartości zadanych SP z rys. 5.14. Jeśli więc chwilowa wartość sygnału wyjściowego obiektu jest równa PV_x wówczas z rys. 5.15 wynika, że:



Rys. 5.15 Trójkątne funkcje przynależności dla funkcji z rys. 5.14

$$n_1 = \frac{SP_3 - PV_x}{SP_3 - SP_2}$$

$$n_2 = 1 - n_1$$

$$k_{px(fuzzy)} = n_1 k_{p2} + n_2 k_{p3}$$

$$T_{ix(fuzzy)} = \frac{k_{p2} n_1 T_{i2} + k_{p3} n_2 T_{i3}}{k_{px(fuzzy)}}$$

$$T_{dx(fuzzy)} = W_{PID} \frac{T_{ix(fuzzy)}}{4}$$

gdzie:

SP ₃ , SP ₂	wartości zadane dla punktów pracy P ₃ i P ₂
PV _x	rzeczywista wartość regulowana w punkcie pracy P _x ,
k _{p2} , k _{p3}	współczynniki wzmocnienia w punktach pracy P ₂ i P ₃
k _{px(fuzzy)}	współczynnik wzmocnienia w rzeczywistym punkcie pracy P _x
T _{i2} , T _{i3}	czasy zdwojenia w punktach pracy P ₂ i P ₃
T _{ix(fuzzy)}	czas zdwojenia w rzeczywistym punkcie pracy P _x
T _{dx(fuzzy)}	czas wyprzedzenia w rzeczywistym punkcie pracy P _x
W _{PID}	współczynnik określający: W _{PID} = 0 => - regulacja PI; W _{PID} = 1 => - regulacja PID

W danym, zdefiniowanym punkcie pracy regulator pobiera odpowiedni zestaw nastaw (identyfikatorem punktu pracy jest wartość zadana SP) i reguluje wg pobranych nastaw PID.

W przypadku, kiedy rzeczywisty punkt pracy znajduje się pomiędzy punktami zdefiniowanymi, algorytm dokonuje korekty nastaw w oparciu o logikę rozmytą "fuzzy logic".

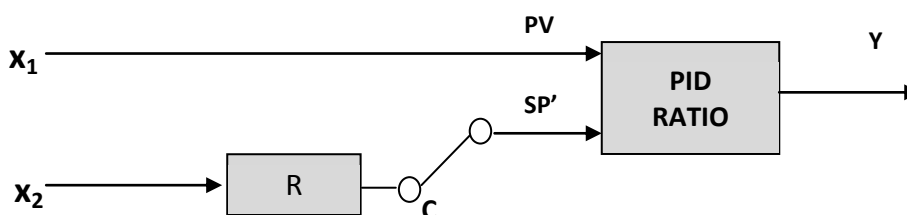
Model obiektu regulacji, z którym w czasie badań współpracował regulator LB-600, musiał odwzorowywać niebanalną skalę trudności rozmaitych obiektów spotykanych w praktyce przemysłowej, zarówno pod względem nieliniowych charakterystyk statycznych jak i dynamiki. Uznano, że dla celów badawczych wystarczającą różnorodność i skalę trudności problemu są w stanie zapewnić obiekty o charakterystyce statycznej kwadratowej oraz o charakterystyce o dużym wzmocnieniu w środkowej części zakresu regulacji. Za miarę skali komplikacji obiektu uznawano różnice wartości współczynnika wzmocnienia regulatora w różnych punktach pracy, wyznaczanego wg tych samych zasad, np. w opisaney wyżej procedurze. Parametry procedury samostrojzenia raz dobrane nie były zmieniane w czasie trwania eksperymentu, przez co w różnych punktach pracy tolerancje nastaw regulatora, będących wynikiem działania tej procedury, były zbliżone.

Jako dostatecznie trudny przypadek dynamiki obiektu uznaje się zwykle obecność członu nieminimalnofazowego transmitancji, co zostało wykorzystane w badaniach regulatora [AP5].

Testem regulatora LB-600, przekonującym potencjalnych nabywców aparatu o jego walorach, jest jego poprawna praca w takich warunkach, w których konwencjonalny regulator zapewnia zadowalającą jakość regulacji tylko lokalnie wokół punktu pracy i nie jest w stanie poprawnie działać przy zmianach wartości zadanej w szerszym zakresie.

W celu wprowadzenia do układu złożonych nieliniowości, pozwalających uwypuklić właściwości algorytmu PID-fuzzy regulatora, wykorzystano w czasie badań dodatkowy (zewnętrzny) układ elektroniczny o przestrajanej charakterystyce oraz nieliniowe procedury warstwy 1 regulatora LB-600. Dobór parametrów charakterystyk nieliniowych był dokonywany eksperymentalnie tak, aby osiągnąć wymaganą, opisaną wyżej skalę trudności z punktu widzenia algorytmu regulatora LB-600.

5.2 Regulacja stosunku dwóch różnych wielkości



Rys. 5.16 Schemat poglądowy regulacji stosunku dwóch wielkości

Ustawienie wartości stosunku R dwóch wielkości z tego samego zakresu pomiarowego, nie stanowi większego problemu.

Dla przykładu:

- ustawić wartość $R = \frac{1}{2}$ dla dwóch temperatur $T_1 = x_1$, mierzone w zakresie 0...100°C oraz $T_2 = x_2$ mierzone w tym samym zakresie. W przykładzie wielkością regulowaną jest x_1 , czyli T_1 . Aby zachować założoną wartość stosunku, należy w przełączeniu regulatora „C”, wypracować wartość zadaną SP' do której ma dążyć temperatura T_1 . Obliczamy:

$$R = \frac{SP'}{T_2} = \frac{1}{2} ; \quad SP' = \frac{T_2}{2}$$

W przypadku rzeczywistym, kiedy należy ustawić stosunek przepływów gazu i powietrza opalającego wannę szklarską, gdzie przepływ powietrza x_1 mierzony jest w zakresie 0...1850m³/h, a gaz x_2 w zakresie 0...450m³/h, sprawa wyliczenia wartości R jest dosyć trudna i aby zachować wartość stosunku gazu do powietrza na poziomie $\frac{x_1}{x_2} = \frac{1}{2}$ (1m³ gazu, 2m³ powietrza), obliczamy:

$$SP' = R x_2 \frac{1850}{450} \rightarrow \frac{SP'}{x_2} = 4,11R \rightarrow \frac{x_1}{x_2} = 4,11R \rightarrow R = \frac{1}{8,22} = 0,1216$$

Wniosek: aby uzyskać wartość stosunku gazu do powietrza = 0,5, należy w regulatorze wpisać $R = 0,1216$.

W przypadku kiedy wielkości x_1 oraz x_2 spełniają warunki:

$$x_{1max} \neq x_{2max} \text{ oraz } x_{1min} \neq 0 \text{ i } x_{2min} \neq 0$$

Zastosowanie mają poniższe wzory:

$$SP' = R \left[(x_2 - x_{2min}) \left(\frac{x_{1max} - x_{1min}}{x_{2max} - x_{2min}} \right) + x_{1min} \right]$$

$$R = SP' \frac{x_{2max} - x_{2min}}{(x_2 - x_{2min})(x_{1max} - x_{1min}) + x_{1min}(x_{2max} - x_{2min})}$$

Gdzie:

- SP'** - wartość zadana wyliczana na podstawie wzoru;
- R** - wartość współczynnika RATIO;
- C** - tryb pracy regulatora „Kaskada”;
- Y** - wyjście bloku regulatora PID RATIO;
- x₁** - wartość regulowana PV (wartość ustawiana w parametrach 7-x-07 = x_1 (PV)_{MIN} i 7-x-08 = x_2 (PV)_{MAX};
- x₂** - wartość wejściowa, na podstawie której oraz współczynnika R wyliczana jest wartość zadana SP' dla regulacji PID RATIO.

W przypadku kiedy obie wielkości x_{1min} oraz x_{2min} posiadają wartość 0, wtedy wzory upraszczają się do postaci:

$$SP' = R x_2 \frac{x_{1max}}{x_{2max}} \quad R = \frac{SP' x_{2max}}{x_2 x_{1max}}$$

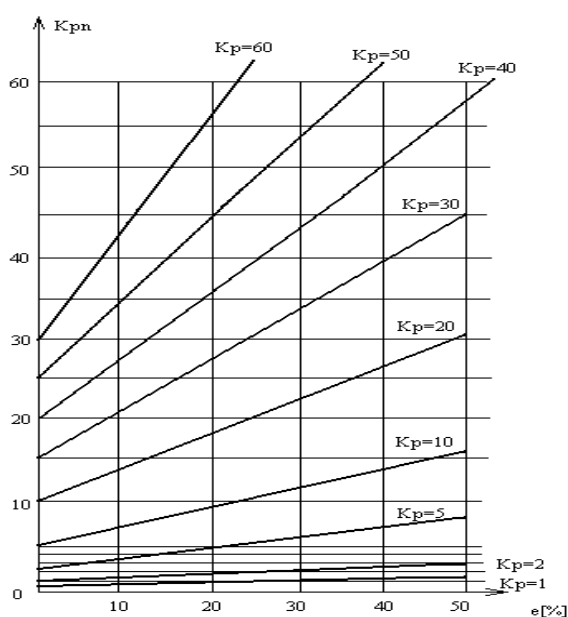
5.3 Regulacja nieliniowa – algorytm NL1

Niektóre obiekty o charakterystyce nieliniowej, które nie mogą być stabilnie regulowane przy wykorzystaniu podstawowego algorytmu PID, wymagają specjalnych algorytmów np. z progresją nastaw. W regulatorze LB-600 zastosowano algorytm NL1 z progresją współczynnika wzmocnienia k_p , tak więc matematyczny zapis algorytmu z progresją współczynnika wzmocnienia przedstawia się następująco:

$$k_{pn} = k_p(2|\epsilon_n| + 0,5)$$

$$CV_n = CV_{n-1} + R \left\{ k_{pn} + k_p \left[\frac{TP}{T_i} \epsilon_n + \frac{T_d \alpha}{TP} (\epsilon_n - 2\epsilon_{n-1} + \epsilon_{n-2}) \right] \right\}$$

gdzie: CV – sygnał sterujący (sygnał wyjściowy z regulatora); R – współczynnik rewersji (dla R=1 działanie normalne, R=-1 działanie odwrotne – rewers); k_p – współczynnik wzmocnienia, TP – czas próbkowania; T_i – czas całkowania (zdwojenia); T_d – czas różniczkowania (wyprzedzenia); α – współczynnik ograniczenia różniczkowania; n – wskaźnik obiegu pętli obliczeniowej z okresem TP. Na rys. 5.17 przedstawione zostały charakterystyki $k_{pn} = f(\epsilon)$.



Rys. 5.17 Charakterystyki $k_{pn} = f(e)$ – gdzie $e = \epsilon$

5.4 Regulacja nieliniowa – algorytm NL2

Innym algorytmem wykorzystywanym do regulacji układów nieliniowych jest algorytm NL2 z progresją czasu całkowania. Zapis matematyczny algorytmu:

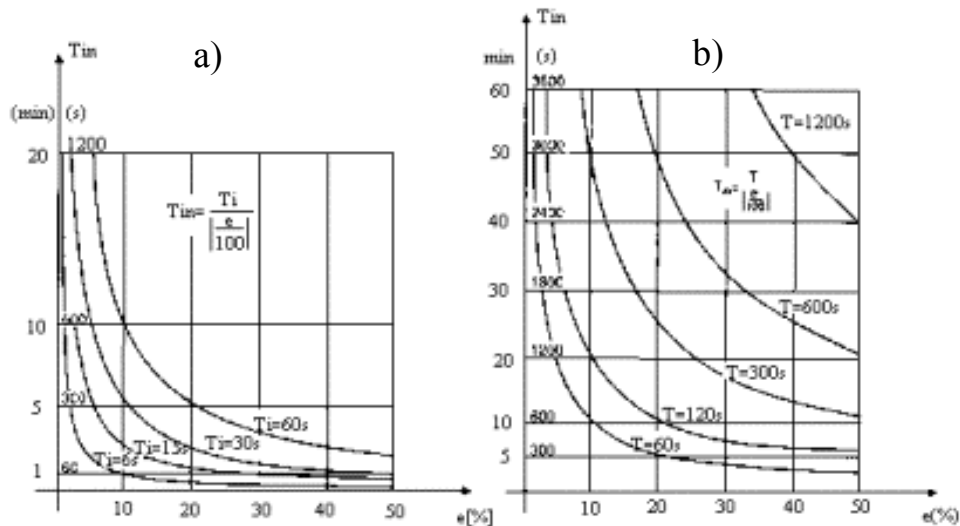
$$T_{in} = \frac{T_i}{|\varepsilon_n| + 10^{-19}}$$

(w mianowniku ułamka wprowadzono małą liczbę 10^{-19} , aby uniknąć dzielenia przez zero).

$$CV_n = CV_{n-1} + Rk_p \left[(\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1}) + \frac{TP}{T_{in}} + \frac{T_d \alpha}{TP} (\varepsilon_n - 2\varepsilon_{n-1} + \varepsilon_{n-2}) \right]$$

gdzie: oznaczenia jak w poprzednim punkcie.

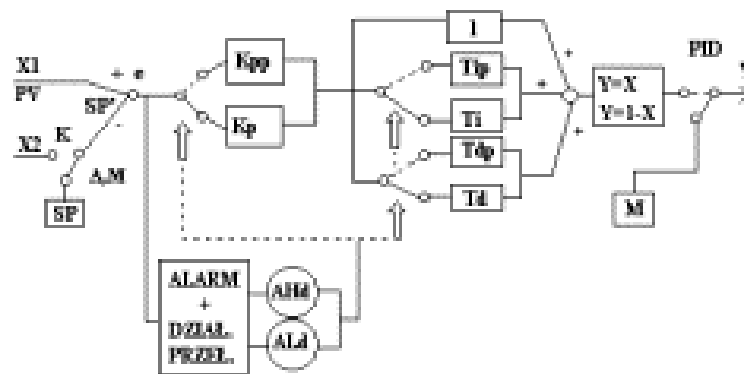
Na rys. 5.18 przedstawiono charakterystyki $T_{in} = f(e)$



Rys. 5.18 Charakterystyki $T_{in} = f(e)$, gdzie $e = \varepsilon$ dla: a) $T_i \leq 60s$ oraz b) $T_i \geq 60s$

5.5 Regulacja przełączna

W pewnych przypadkach obiektów nieliniowych, wystarczy zastosować dwa niezależne regulatory o odpowiednich dla poszczególnych punktów pracy nastawach PID, aby uzyskać odpowiednią jakość regulacji. Przykładem takim może być tzw. regulacja przełączna, zaimplementowana w regulatorze LB-600. Dwa zestawy nastaw PID: k_p , T_i i T_d oraz k_{pp} , T_{ip} oraz T_{dp} , tworzą dwa regulatory, które w zależności od ustawionego stanu alarmowego uchybu regulacji ε , są automatycznie przełączane (raz pracuje jeden, raz drugi). Rys. 5.19 przedstawia blokową realizację koncepcji regulacji przełącznej.



Rys. 5.19 Schemat blokowy przedstawiający koncepcję regulacji przełącznej (dwa regulatorowej).

Przykład regulacji przełącznej z dwoma regulatorami występuje w regulatorze LB-600, jako pozostałość koncepcji realizowanej ok. 15 lat temu w regulatorach rodziny EFTRONIK X (również opracowanie autora pracy). Obecnie bardziej nowoczesna jest koncepcja przedstawiona w rozdz. 5.8 „Regulacje tablicowe”.

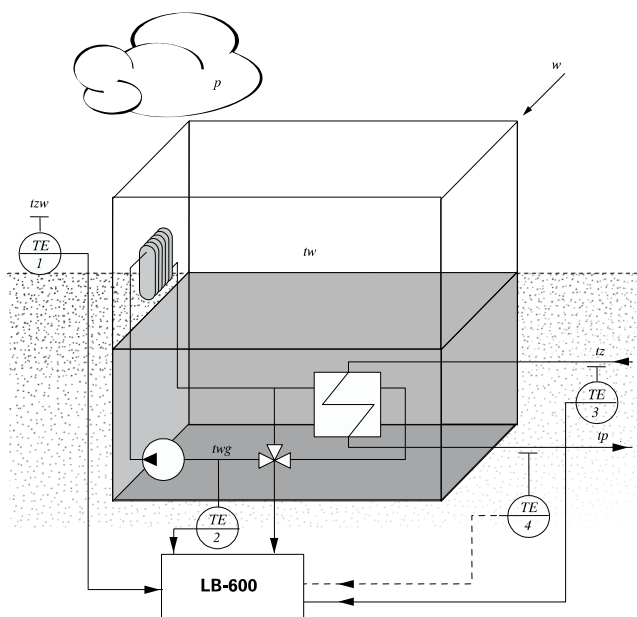
5.6 Regulacja pogodowo-okresowa

Ciekawą aplikacją regulatora uniwersalnego LB-600 stanowi układ regulacji pogodowej możliwej do zastosowania w węzłach ciepłowniczych budynków. W zadaniu automatyzacji węzła spotykają się interesy dostawców i odbiorców energii. Ci pierwsi chcieliby jej sprzedać jak najwięcej pokrywając zapotrzebowanie odbiorców (w tym celu ważne są dla nich prognozy meteorologiczne, aby dobrze planować temperaturę wody zasilającej odbiorców – t_z), a jednocześnie zapewnić sobie małe zakłócenia pracy kotłów, co przekłada się na żądanie, aby temperatura wody powracającej, t_p była stała. Podstawą rozważań nie może być jakaś uniwersalna struktura systemu grzewczego, jego automatyzacji i sformułowania zadania (celu sterowania, ograniczeń fizycznych i wskaźników oceny jakości), ponieważ zależy on od topologii sieci (kotłownia lokalna/centralna, układ i stan magistral przesyłowych, rodzaj odbiorców – komunalni/użyteczności publicznej/przemysłowi), a także od właściwości eksploatowanych przez odbiorców urządzeń. W jednej z ciepłowni przyjmuje się na przykład następujące temperatury wody oddawanej do sieci T_{co} w funkcji temperatury zewnętrznej T_{zw} :

$T_{zw} < -22^{\circ}\text{C} \rightarrow T_{co} = 14^{\circ}\text{C}$	wynika z ograniczenia parametrów użytkownika kotła
$-22^{\circ}\text{C} < T_{zw} < 7^{\circ}\text{C} \rightarrow T_{co} \rightarrow$	jest obliczane na podstawie specjalnych procedur i wymagań producenta energii cieplnej; jest to właściwy zakres regulacji
$7^{\circ}\text{C} < T_{zw} \rightarrow T_{co} = 65^{\circ}\text{C}$	wynika z ograniczenia na minimalną temperaturę wody używanej do celów sanitarnych

Odbiorcy energii z kolei (w tym opracowaniu odbiorcami są służby nadzorujące pracę węzłów ciepłowniczych) chcą pobierać tyle energii, aby zapewnić komfort temperaturowy indywidualnym użytkownikom lokali (stałą temperaturę wewnętrzną t_w) w warunkach silnych

zakłóceń w postaci: zmieniających się warunków atmosferycznych – wahań temperatury na zewnątrz budynku t_{zw} , siły i kierunku wiatru (w), stopnia zachmurzenia (p). Wszystko to wpływa silnie na straty energii w budynku. Objawia się też nieliniowa zależność współczynnika oddawania ciepła zarówno w wymienniku (woda – woda), w ogrzewanych pomieszczeniach (woda – powietrze) jak i stratach do otoczenia; straty te w dużej części mogą być szacowane na podstawie parametrów konstrukcyjnych budynków i prognoz meteorologicznych. Czynniki wpływające na eksploatację węzła ciepłowniczego są zaznaczone na rys. 5.20.



Rys. 5.20 System ogrzewania budynku jako obiekt regulacji pogodowej

Nie bez znaczenia jest konstrukcja i stan techniczny instalacji grzewczej. Ze względu na nieliniowe związki między wielkościami charakteryzującymi system ogrzewania, specjaliści od ciepłownictwa opracowują wytyczne dla automatyki węzłów ciepłowniczych, zwane krzywymi grzania, z których wyznacza się współczynniki modelu liniowego $K1$ i $K2$ uzależniającego wartość zadaną temperatury t_{wg}^z dla układu kaskadowej regulacji temperatury wody gorącej t_{wg} podawanej do centralnego ogrzewania:

$$t_{wg}^z = K1(1 - t_{zw}) + K2$$

Dla jednej z instalacji w budynku współczynniki te miały wartość $K1 = 1,45$, $K2 = -0,32$. Czwarty punkt pomiarowy ma połączenie linią przerywaną, ponieważ sygnał z niego pochodzący nie jest wykorzystywany do regulacji, a tylko do oceny pracy wymiennika według zaleceń dostawcy energii.

Przykład zrealizowany przy wykorzystaniu regulatora LB-600

Regulację zrealizowano w oparciu o podstawy teoretyczne. Teoretyczna temperatura zasilania i powrotu w zależności od temperatury zewnętrznej:

$$t'_z = t_w + w_p \left(\frac{t'_z + t''_p}{2} - t_w \right) \varphi^{\frac{1}{m+1}} + \frac{1}{2} (t'_z - t''_p) \frac{\varphi}{\psi}$$

$$t'_p = t_w + w_p \left(\frac{t'_z + t''_p}{2} - t_w \right) \varphi^{\frac{1}{m+1}} - \frac{1}{2} (t'_z - t''_p) \frac{\varphi}{\psi}$$

gdzie: j - względne obciążenie cieplne budynków, $\psi \cong \sqrt{\varphi}$

$$\frac{t_w - t_z}{t_w - t_{zw}}$$

jest to współczynnik mocy cieplnej,

w_p - iloczyn wybranych współczynników; w (w_1, w_2, w_3) i p (p_1, p_2, p_3).

Do obliczeń przyjęto następujące wartości:

- temperatura wewnętrzna $t_w = 20^\circ\text{C}$
- temperatura zewnętrzna $t_{zw} = 20^\circ\text{C}$
- temperatura zasilania $t_z = 90^\circ\text{C}$

Współczynniki:

- w_1 - wietrzność duża $\rightarrow 1,000$
- w_2 - wietrzność umiarkowana $\rightarrow 0,925$
- w_3 - wietrzność mała (cisza) $\rightarrow 0,850$
- p_1 - pochmurno $\rightarrow 1,000$
- p_2 - zachmurzenie zmienne $\rightarrow 0,950$
- p_3 - słonecznie $\rightarrow 0,900$
- t_p - temperatura powrotu $\rightarrow 70^\circ\text{C}$
- m - parametr grzejników $\rightarrow 0,33$

do obliczeń przyjęto $w_2 = 0,925$ i $p_2 = 0,95$

Do regulacji wykorzystano regulator LB-600, w którym: w torze 1 mierzona jest temperatura zewnętrzna t_z , w torze 2 temperatura zasilania, w torze 3 temperatura powrotu t_p .

Do obliczeń współczynników K_1 i K_2 wykorzystano krzywą grzania przedstawioną w tabelicy 1. Do obliczeń wartości współczynników K_1 i K_2 wykorzystano zaznaczoną krzywą grzania powstałą z obliczeń uwzględniających współczynniki wietrzności i zachmurzenia. Do obliczeń wykorzystano metodę analizy regresji liniowej. W regulatorze wykorzystano równanie:

$$Y = K_2 + \frac{(K_1 X_1 + X_2)}{K_1 + 1}$$

gdzie: X_1 - temperatura zewnętrzna w skali znormalizowanej, $X_2 = 0,00$

Obliczone współczynniki to:

$$K1 = -0,577; K2 = 0,969$$

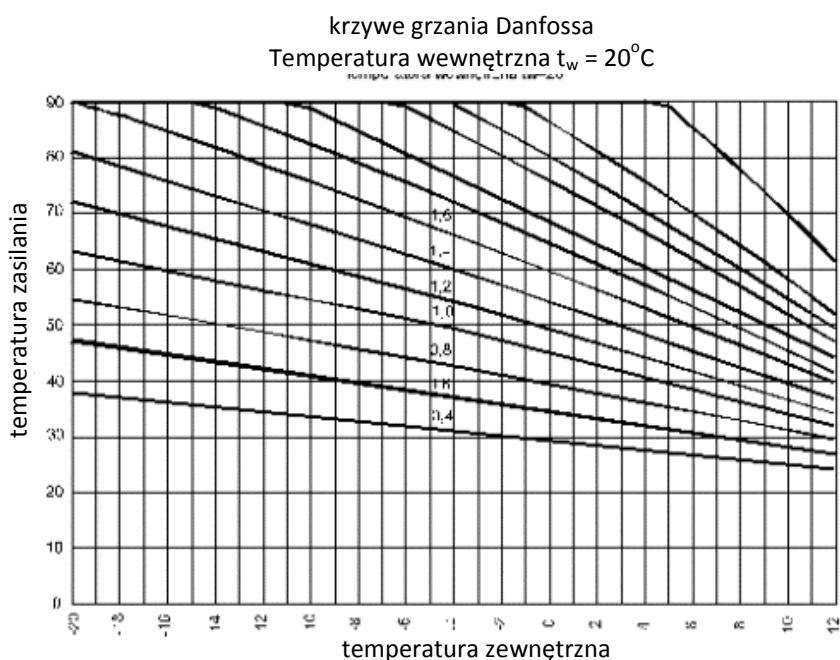
Wartości funkcji Y przedstawiono w przedostatniej (zaznaczonej kolumnie tablicy). Wartość funkcji rzutowana na skalę rzeczywistą daje wartość zadaną dla regulacji kaskadowej nadążnej. Poniżej na rys.9 przedstawiono zestaw krzywych wg. Danfossa. Najbardziej zbliżona do obliczonej jest krzywa 1.4).

Obliczone wartości współczynników K1 i K2 odwzorowują funkcję grzania z dokładnością satysfakcjonującą użytkownika (w skrajnym przypadku odchyłka maksymalna wynosi 1,76°C). Przy wykorzystaniu dodatkowych funktołów warstw 3, 4, 5, 6 lub utworzenia (na zdefiniowane życzenie użytkownika) specjalnych funkcji ciepłowniczych (np. zapisywanie całych tablic grzania do pamięci regulatora) można uzyskać jeszcze większą dokładność regulacji.

Tablica 5.1. Tablica współczynników grzania

Współczynnik mocy cieplnej	Temperatura zewnętrzna	krzywe grzania wg. Tab. 1(tz)	krzywe grzania	wg. Danfoss krzywa 1.4	Temp. zewnętrzna (-30 do +70 C)	Temp. zewnętrzna (0 do +70 C)	Y=K2+(K1*X1+X2)/(K1+1)	Różnica od krzywej teoretycznej
	t _z	t _z	t _p	t _z	X1	X2	Y	t
1,000	-20	81,5	63,9	81,4	0,10	0,64	0,833	1,76
0,975	-19	80,4	63,1	80,2	0,11	0,63	0,819	1,50
0,950	-18	79,3	62,2	79,0	0,12	0,62	0,805	1,23
0,925	-17	78,2	61,3	77,7	0,13	0,61	0,792	0,97
0,900	-16	77,0	60,4	76,5	0,14	0,60	0,778	0,80
0,875	-15	75,9	59,5	75,2	0,15	0,59	0,764	0,54
0,850	-14	74,8	58,6	74,0	0,16	0,59	0,751	0,27
0,825	-13	73,6	57,6	72,7	0,17	0,58	0,737	0,11
0,800	-12	72,4	56,7	71,4	0,18	0,57	0,723	-0,05
0,775	-11	71,3	55,8	70,1	0,19	0,56	0,710	-0,32
0,750	-10	70,1	54,9	68,8	0,20	0,55	0,696	-0,48
0,725	-9	68,9	53,9	67,5	0,21	0,54	0,683	-0,65
0,700	-8	67,7	53,0	66,2	0,22	0,53	0,669	-0,81
0,675	-7	66,5	52,0	64,9	0,23	0,52	0,655	-0,97
0,650	-6	65,2	51,1	63,6	0,24	0,51	0,642	-1,04
0,625	-5	64,0	50,1	62,2	0,25	0,50	0,628	-1,20
0,600	-4	62,7	49,1	60,9	0,26	0,49	0,614	-1,27
0,575	-3	61,4	48,1	59,5	0,27	0,48	0,601	-1,33
0,550	-2	60,2	47,1	58,2	0,28	0,47	0,587	-1,49
0,525	-1	58,8	46,1	56,8	0,29	0,46	0,573	-1,46
0,500	0	57,5	45,1	55,4	0,30	0,45	0,560	-1,52
0,475	1	56,2	44,1	54,0	0,31	0,44	0,546	-1,59
0,450	2	54,8	43,0	52,6	0,32	0,43	0,532	-1,55
0,425	3	53,4	42,0	51,1	0,33	0,42	0,519	-1,51
0,400	4	52,0	40,9	49,7	0,34	0,41	0,505	-1,48
0,375	5	50,6	39,8	48,2	0,35	0,40	0,492	-1,44
0,350	6	49,1	38,7	46,7	0,36	0,39	0,478	-1,31
0,325	7	47,7	37,6	45,2	0,37	0,38	0,464	-1,27
0,300	8	46,1	36,5	43,6	0,38	0,37	0,451	-1,03
0,275	9	44,6	35,4	42,1	0,39	0,35	0,437	-0,90
0,250	10	43,0	34,2	40,5	0,40	0,34	0,423	-0,66
0,225	11	41,3	33,0	38,8	0,41	0,33	0,410	-0,33

Na rys. 5.21 przedstawiono tzw. „krzywe grzania” prezentowane przez firmę Danfoss, znanego producenta aparatury kontrolno-pomiarowej między innymi dla ciepłownictwa.



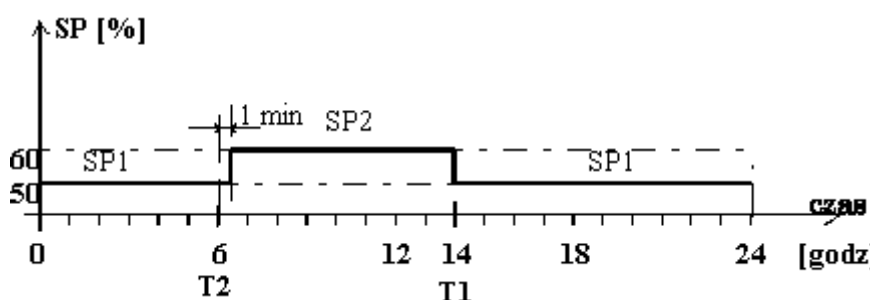
Rys. 5.21 Krzywe grzania Danfossa

5.7 Regulacja programowa

Wyróżnia się trzy podstawowe zadania regulacji: regulację stałowartościową, programową i nadążną. W regulacji stałowartościowej wartość zadana jest stała lub rzadko zmieniana, tak że procesy przejściowe wywołane tymi zmianami trwają znacznie krócej od stanu ustalonego; oczywiście może istnieć permanentna składowa stanu przejściowego wywołana działaniem zakłóceń. W regulacji nadążnej wartość zadana zmienia się według nieznanego z góry prawa, oczekuje się tylko, że funkcja wyrażająca wartość zadana należy do pewnej klasy, np. jest funkcją ciągłą o ograniczonej wartości pochodnej. Przykładem układu regulacji nadążnej jest rejestrator o ciągłym zapisie. Regulacją programową nazywamy takie zadanie, w którym wartość zadana może zmieniać się według znanej z góry funkcji. Przykładem może być proces automatycznej realizacji profilu temperatury w piecu do wypalania ceramiki, w którym przez czas znacznie dłuższy od stałych czasowych pieca należy zwiększać wartość zadana dla regulatora temperatury w taki sposób, aby w efekcie regulacji nie wywołać naprężeń i odkształceń wsadu, potem przez określony czas odbywa się wypalanie, a po jego zakończeniu odbywa się studzenie wsadu z prędkością nie wywołującą pęknięcia materiału.

Oczywiście różnym zadaniom regulacji odpowiadają różne, odpowiednie dla nich wskaźniki jakości. Charakterystyczne dla układu regulacji programowej jest występowanie zadajnika, w którego pamięci przechowywany jest zapis wartości zadanej oraz możliwość jej odtwo-

zenia w rzeczywistej skali czasu. Stąd najwcześniejsze zadajniki analogowe miały postać potencjometrów z układami krzywek, napędzanych silnikami synchronicznymi. Rozwiązania takie nie zapewniały niezbędnej elastyczności programów wartości zadanej. Można zauważyć, że każdy regulator przystosowany do przyjmowania zewnętrznej wartości zadanej i połączony z zadajnikiem może realizować regulację programową. Współczesne zadajniki, będące integralną częścią regulatora, są częścią pamięci układu mikroprocesorowego dostępną do programowania przez użytkownika, z tym, że wprowadzanie do programu regulatora odpowiedniej informacji dotyczącej wartości zadanej musi odbywać się według kalendarza i czasu astronomicznego. Przebieg regulacji programowej jest więc wynikiem "sklejenia" przebiegów regulacji stałowartościowej lub nadążnej o zadanym profilu. Nie należy mylić regulacji programowej ze sterowaniem sekwencyjnym, w którym przejście do następnego kroku jest uzależnione od spełnienia określonych w zadaniu warunków logicznych.

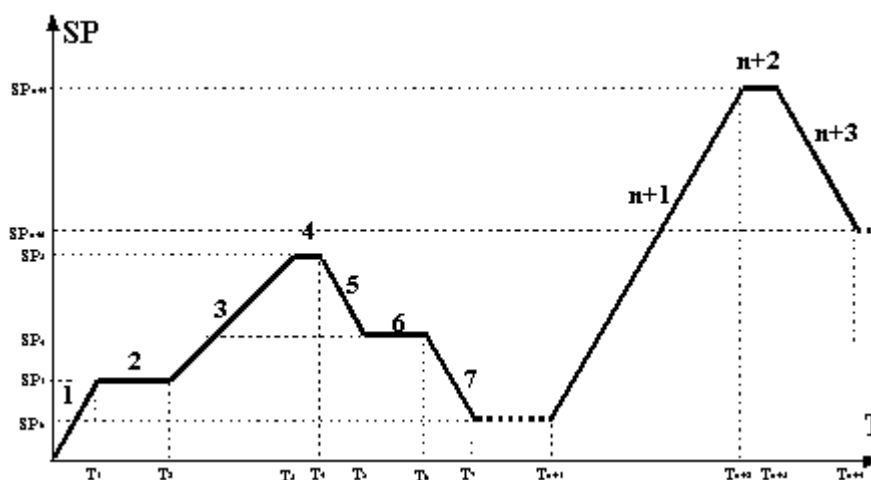


Rys. 5.22 Przykład realizacji algorytmu „Program dwustrefowy” dla wybranego dnia

Jednym z najistotniejszych czynników decydujących o komforcie życia w naszej strefie klimatycznej, a jednocześnie generującym jeden z ważniejszych składników kosztów jest zużycie energii do celów grzewczych. Konieczność jej oszczędzania oraz dostosowania zużycia do cykli biologicznych (praca – aktywny odpoczynek – sen) lub aktywności zawodowej (ruch – zatrzymanie wydziału produkcyjnego) sprawiają, że najprostsze nawet procedury regulacji programowej mogą przynieść znaczne korzyści. Na rys. 5.22 jest pokazany przykład realizacji funkcji dwustrefowej dla systemu ogrzewania budynku biurowego, w którym pracownicy przebywają od godz. 8 do 16. Po godzinach pracy wartość zadaną dla regulatora temperatury można zmniejszyć o 20%. Rankiem, z pewnym wyprzedzeniem zależnym od dynamiki nagrzewania, zmieniana jest wartość zadana SP z 50 % na 60 %. Podobnie przed zakończeniem pracy, z wyprzedzeniem, zmniejsza się wartość zadaną. Cały czas może być używany algorytm regulacji PI lub PID. Funkcjonalnie, jak było już wyżej wspomniane, regulacji takiej może służyć aparat zdolny do przyjmowania zewnętrznej wartości zadanej (jak regulator podrzędny w regulacji kaskadowej) z dostępnym obszarem pamięci do programowania stref włączenia i wyłączenia (w przystępnym formacie) oraz zapamiętywania numerów wybranych dni kalendarzowych (oznaczających dni wolne od pracy), itp. Cechy te ma omawiany już wyżej regulator LB-600. W każdym dniu objętym programem dwustrefowym należy ustawić wartość wszystkich czterech parametrów: T1, T2, SP1, SP2. Funkcja program

dwustrefowy jest realizowana w oparciu o zegar czasu rzeczywistego (ustawiany w parametrach generalnych – warstwa "0"). Wyliczony na podstawie zegara "numer dnia" umożliwia wykorzystanie umieszczonych wcześniej w tablicy funkcji wartości parametrów T1, T2, SP1, SP2 dla wybranego dnia. Algorytm regulacji dwustrefowej można z powodzeniem wykorzystać do regulacji pogodowej, wtedy parametry będą w poszczególnych strefach (dzień/noc) korygowane w funkcji temperatury panującej na zewnątrz. Program regulacji dwustrefowej tak jak wszystkie programy tablicowe jest uruchamiany, zatrzymywany i pauzowany poprzez zaprogramowanie odpowiednich stanów binarnych (alarmy, stany logiczne, czasowe, itp.) w tzw. Rejestrze Stanów Binarnych – RSB³. Sposób zapisywania parametrów w tablicach regulacji dwustrefowej przedstawiono w rozdz. 5.8 „Regulacje tablicowe”.

Regulator LB-600 stwarza możliwość realizacji bardziej złożonej regulacji programowej – tzw. programu czasowego. Idea programu czasowego była sygnalizowana wyżej w przykładzie pieca do wypalania ceramiki. W omawianym aparacie program czasowy realizowany jest przez algorytm zmiany wartości zadanej w kolejnych krokach, których liczba może wynosić do 400. Dla każdego z nich podaje się długość (czas trwania) kroku i wartość zadaną – rys. 5.23. W przypadku, gdy w kroku k wartość zadana $SP_k \neq SP_{k+1}$, to w czasie odliczania zaprogramowanego czasu t_k realizowana jest liniowa lub nieliniowa aproksymacja między wartościami SP_k i SP_{k+1} . W przypadku, gdy $SP_k = SP_{k+1}$, zaprogramowany czas t_k stanowi okres trwania wartości zadanej na stałym poziomie.



Rys. 5.23 Przykład realizacji funkcji „Program czasowy”

W każdym kroku użytym w funkcji „Program czasowy” należy ustawić wartości wszystkich trzech parametrów. Funkcja „Program czasowy umożliwia realizację do 9999 pętli programowych czyli zapisania w tablicach parametrów tzw. numeru kroku powrotu (krok do którego, po wykonaniu wszystkich kroków ma program powrócić , aby rozpocząć realizację ko-

³ Koncepcja i nazwa zaproponowane przez autora pracy

lejnej pętli oraz liczbę realizowanych pętli programowych. Sposób zapisywania parametrów w tablicach regulacji czasowej przedstawiono w rozdz. 5.8 „Regulacje tablicowe”.

5.8 Regulacje tablicowe⁴

Pojęcie regulacji tablicowej zostało zastosowane w stosunku do tych algorytmów regulacji, które wykorzystują tablice z zapisanymi parametrami, a dokładniej zestawami parametrów. Każdy zestaw parametrów może zajmować do pięciu komórek pamięci, niektóre algorytmy wykorzystują cztery komórki. Pamięć zarezerwowana dla tablic obejmuje 2000 komórek, czyli istnieje możliwość zapisu do 400 zestawów parametrów. Podział tablic oraz ich wielkość dla poszczególnych programów jest dowolny, przy czym należy zwracać uwagę na niepokrywanie się obszarów dla różnych programów. Możliwe jest korzystanie z tablicy wspólnej dla kilku kanałów regulacji, przy założeniu realizacji tego samego programu regulacji tablicowej. Wyboru programu tablicowego dokonuje się poprzez wpisanie pod adres 7x37 odpowiedniego kodu (patrz tablica 5.2) – kolorem żółtym zaznaczono wszystkie programy realizowane przy wykorzystaniu tablic. Oprócz wyboru funkcji regulacji tablicowej, należy dla kanału (7x38), który ma realizować tę funkcję wpisać adres początkowy tablicy z zakresu 0001 do 0400. Pod adresami 7x42, 7x43 i 7x44 – wpisuje się adres stanów binarnych z rejestru RSB, które realizują START, STOP i PAUZĘ funkcji regulacji tablicowej – patrz tablica 5.3..

Tablica 5.2

<p>7 x 37</p> <p>x = 1...8</p> <p>(numer kanału regulacji)</p>	<p>0000 - praca normalna</p> <p>0001 - program dwustrefowy</p> <p>0002 - regulacja programowa</p> <p>0003 - funkcja PID Fuzzy Logic</p> <p>0004 - funkcja regulacji adaptacyjnej (k_p, T_i, T_d) = f(e)</p> <p>0005 - funkcja BACKUP</p> <p>0006 - funkcja FEED FORWARD</p> <p>0007 - tablice nastaw PID (SP, T_i, T_d, RSB) przełączane stanem RSB</p>
<p>7 x 38</p> <p>x = 1...8</p> <p>(numer kanału regulacji)</p>	<p>0001</p> <p>.</p> <p>. adres początku tablicy</p> <p>.</p> <p>0400</p>

Tablica 5.3

<p>7 x 42</p> <p>x = 1...8</p> <p>(numer kanału regulacji)</p>	<p>0012</p> <p>.</p> <p>. RSB - START programów czasowych, procedur samostrojenia,</p>
--	--

⁴ Koncepcja, nazwy oraz wszystkie algorytmy regulacji tablicowych zaproponowane i opracowane przez autora pracy

	<ul style="list-style-type: none"> . „feed forward”, regulacji programowej, dwustrefowej 0533
<p style="text-align: center;">7 x 43</p> <p style="text-align: center;">x = 1...8</p> <p><i>(numer kanału regulacji)</i></p>	0012 <ul style="list-style-type: none"> . RSB - STOP programów czasowych, procedur samostrojzenia, . „feed forward”, regulacji programowej, dwustrefowej 0533
<p style="text-align: center;">7 x 44</p> <p style="text-align: center;">x = 1...8</p> <p><i>(numer kanału regulacji)</i></p>	0012 <ul style="list-style-type: none"> . RSB – PAUZA programów czasowych, procedur samostrojzenia, . „feed forward”, regulacji programowej, dwustrefowej 0533

Działanie programu „Regulacja dwustrefowa” zostało opisane w poprzednim rozdziale, tutaj zostanie jedynie przedstawiony sposób zapisu parametrów do tablic. Jak już wspomniano wcześniej, każdy program regulacji tablicowej ma dostępne pięć komórek pamięci, tworząc moduł parametrów. Adresowanie komórek polega na zapisaniu w miejsce „xxx” (tab.5.4) kolejnych numerów modułów od 001 do 400. W przypadku programu dwustrefowego adresem jest kolejny dzień roku, począwszy od 001 → 1 stycznia, a skończywszy na 365 (366) – 31 grudnia. Dla każdego dnia zapisuje się zestaw pięciu parametrów, na podstawie tablicy 5.2.

Tablica 5.4 Regulacja dwustrefowa → 7x37 = 0001

ADRES	WARTOŚĆ	OPIS
1	2	3
xxx1	0.000...2359.	Czas T1 włączenia wartości zadanej SP1
xxx2	0.000...2359.	Czas T2 włączenia wartości zadanej SP2
xxx3	-999,0...9999,0	Wartość zadana SP1
xxx4	-999,0...9999,0	Wartość zadana SP2
xxx5	0001,..., 0366	001...366 numer dnia roku

W przypadku realizacji funkcji „program czasowy”, w miejsce „xxx” wpisuje się numer kolejnych kroków programu, patrz rys. 5.23. W ostatnim module pamięci programu, pod adresem xxx3 wpisuje się liczbę realizowanych pętli programu, przy czym wartość ta nie może być równa 0. W komórce pod adresem xxx4 ustawia się numer kroku rozpoczęcia kolejnej pętli programu, który nie musi być równy numerowi kroku startu programu zapisanego w 7x38. W komórce xxx5 zapisuje się funkcję przejścia pomiędzy poszczególnymi wartościami zadanymi SP, realizowanymi w poszczególnych krokach programu. Zgodnie z definicją podaną w tablicy 5.5 dla tego parametru, zapis (xxx5) = 0102, oznacza realizację funkcji przejścia $y = x^a$ gdzie $a = 2$, czyli $y = x^2$.

Tablica 5.5 Regulacja „Program czasowy” → 7x37 = 0002

ADRES	WARTOŚĆ	FUNKCJA / OPIS
1	2	3
xxx1	0000...9999 [s]	Czas trwania realizowanego kroku T_k
xxx2	-999.0 ... 9999	Wartość zadana SP_k w danym kroku programu
xxx3	1.000... 9999. (ustawiać w ostatnim kroku pętli)	Liczba pętli (ustawiać jako liczby całkowite)
xxx4	1.000, ... ,400.0. (ustawiać w ostatnim kroku pętli)	Numer kroku otwarcia pętli (ustawiać jako liczby całkowite + adres początkowy tablicy – 7x38))
xxx5	FF - 00, ... ,99 WW - 00, ... , 99	Kod funkcji przejścia „FF”: 00 - funkcja liniowa $y = x$ 01 - funkcja $y = x^a$ 02 - funkcja $y = -(1-x)^a$ 03 - funkcja $y = a^x$ 04 - funkcja $y = (1-a)^x$ oraz Wartość współczynnika „a”, - „WW” Zapis: FFWW

Program regulacji PID Fuzzy Logic, realizowany jest w oparciu o tablice wypełnione parametrami nastaw PID, uzyskanymi w procesie identyfikacji obiektu nieliniowego – patrz opis z rozdz. 5.1.4.3. Im więcej takich zestawów nastaw zostanie dla danego procesu zapisanych w tablicach, tym dokładniejsza będzie regulacja procesu. W przypadku wykorzystania 400 modułów pamięci do opisu jednego procesu, pozostałe kanały regulatora nie będą mogły realizować funkcji regulacji tablicowej. Przy wykorzystaniu 50 modułów dla danego procesu (co też jest liczbą niebagatelną), każdy z ośmiu kanałów regulacji będzie mógł realizować tę funkcję. Każdy z zapisanych modułów pamięci stanowi tzw. regulator lokalny, dla danego punktu pracy wyznaczonego przez SP_{xxx} [WK1, 11], [AP5], [OA1, 3]. W tablicy 5.6 przedstawiono sposób zapisu nastaw regulacji dla realizacji algorytmu PID Fuzzy Logic.

Tablica 5.6 Regulacja PID Fuzzy Logic → 7x37 = 0003

ADRES	WARTOŚĆ	OPIS
1	2	3
xxx1	-999.0 ... 9999	SP_{xxx}
xxx2	0.1...100.0	$k_{p_{xxx}}$
xxx3	0.000...3600.0	$T_{i_{xxx}}$
xxx4	0.000...3600.0	$T_{d_{xxx}}$
xxx5	rezerwa	-----

Regulacja adaptacyjna realizowana jest w oparciu o wartość aktualnego uchybu regulacji ε . W przypadku tego algorytmu, tablica nie jest realizowana wg. kolejności adresów, lecz wg

wartości uchybu regulacji. Wartości poszczególnych nastaw PID zapisanych w tablicach, uzyskane są z eksperymentów identyfikacyjnych lub ze znajomości specyfiki procesu.

Tablica 5.7 Regulacja adaptacyjna → 7x37 = 0004

ADRES	WARTOŚĆ	OPIS
1	2	3
xxx1	-100, ... ,100.0 [%]	ϵ_{xxx}
xxx2	0.1...100.0	kp _{xxx}
xxx3	0.000...3600.0	Ti _{xxx}
xxx4	0.000...3600.0	Td _{xxx}
xxx5	rezerwa	-----

Kolejny program regulacji tablicowej stanowi udoskonalenie programu regulacji przełącznej przedstawionego w rozdz. 5.5. Różnica polega jedynie na ilości przełączanych zestawów nastaw. Tam były dwa, tutaj może być 400. Przełączanie na dowolny zestaw odbywa się stanami binarnymi z rejestru stanów binarnych RSB. Czyli pojawienie się stanu logicznego „1” w rejestrze RSB o numerze zapisanym w xxx5, powoduje pobranie przez regulator zestawu nastaw PID, związanych z tym właśnie rejestrem. W tablicy 5.8 przedstawiono sposób zapisu wartości nastaw PID, dla realizacji funkcji.

Tablica 5.8 Tablice nastaw PID → 7x37 = 0007

ADRES	WARTOŚĆ	OPIS
1	2	3
xxx1	-999.0 ... 9999	SP _{xxx}
xxx2	0.1...100.0	kp _{xxx}
xxx3	0.000...3600.0	Ti _{xxx}
xxx4	0.000...3600.0	Td _{xxx}
xxx5	0012...0533	Nr RSB, którego stan aktywny (1) powoduje przepisanie powyższych wartości do odpowiednich komórek struktury regulatora.

5.9 Regulacja na podstawie charakterystyk użytkownika

W większości przypadków wielkości mierzone na obiektach przemysłowy stanowią sygnały przetworzone do standardów prądowych (4...20 mA, 0...20 mA), napięciowych (1...5 V, 0...10 V), pneumatycznych (20...100 kPa), itp. Występuje jednak spora liczba czujników różnych wielkości fizycznych np. pomiary fizykochemiczne pH, Redox, pomiary wilgotności gleby np. Theta Probe, pomiary pyranometryczne, pyrgeometryczne, itp. posiadające charakterystyki nieliniowe. W takim przypadku można element podłączyć do regulatora, a jego charakterystykę wpisać do tablic, jak to przedstawiono w tab. 5.9.

Tablica 5.9 Charakterystyka użytkownika

ADRES	WARTOŚĆ	OPIS
1	2	3
xxx1	-999.0 ... 9999	Pierwsza wartość charakterystyki użytkownika
xxx2	-----	-----
xxx3	-----	-----
xxx4	-----	-----
xxx5	0001 ... 0400	Liczba elementów charakterystyki użytkownika (wpisuje się tylko przy pierwszym elemencie ch-tyki)

5.10 Funkcje arytmetyczne

Większość systemów sterowania cyfrowego, posiada możliwość kształtowania charakterystyk sygnałów wejściowych poprzez realizację operacji matematycznych. Podstawowe wykorzystanie funkcji arytmetycznych dotyczą dostosowania skali wielkości mierzonych np. przepływ mierzony za pomocą zwężki i przetwornika różnicy ciśnień jest wyliczany ze stałej zwężki oraz pierwiastka kwadratowego z różnicy ciśnień. Funkcje arytmetyczne wykorzystywane są do linearyzacji wielkości wejściowych (kompensacja nieliniowości), przesunięcia charakterystyk, zmiany nachylenia, wybór wielkości maksymalnej czy minimalnej, operacji dodawania, odejmowania, mnożenia i dzielenia dwóch lub większej ilości zmiennych, generacja wielkości stałych, wyliczanie wartości średnich, itp. Funkcje arytmetyczne realizowane są bezpośrednio na zmiennych wejściowych lub wewnątrz struktury regulatora za pomocą sześćdziesięciu tzw. funktorów arytmetyczno-logicznych⁵.

Większość funkcji arytmetycznych zaimplementowanych w regulatorze LB-600, ma charakter gotowych działań na zmiennych wejściowych zewnętrznych X1, pochodzących z obiektu oraz wewnętrznych X2, pochodzących z dowolnych miejsc struktury funkcjonalnej. Dobierane do działań elementy K1 i K2 stanowią współczynnik, np. równanie prostej w postaci $Y = Ax + B$ jest interpretowane jako $Y = K1X1 + K2$. Każde wejście regulatora może być obsługiwane przez inną funkcję arytmetyczną. Zbiór funkcji realizowanych w stosunku do wielkości wejściowych przedstawiono w ta. 5.10.

⁵ nazwa własna autora pracy

Tablica 5.10 Funkcje arytmetyczne w pierwszej warstwie regulatora

<p>1 x 14</p> <p>Gdzie: x = 1...A; dla S-300 x = 1...8</p>	Algorytmy funkcji przetwarzania sygnałów X1 i X2:	
	0000	$Y = X1;$
	0001	$Y = K1 * X1 + K2;$
	0002	$Y = K1 * (1 - X1) + K2;$
	0003	$Y = K1 * \text{SQRT}(X1) + K2$
	0004	$Y = K1 * X1^2 + K2;$
	0005	$Y = \text{SQRT}((X1^3) + K2);$
	0006	$Y = \text{SQRT}(X1^3) + K2;$
	0007	$Y = \text{SQRT}(K1 * X1 + K2);$
	0008	$Y = K1;$
	0009	$Y = K2 + (K1 * X1 + X2) / (K1 + 1)$
	0010	$Y = K2 + (K1 * X1 - X2 + 1) / (K1 + 1)$
	0011	$Y = K1 * X1 * X2 + K2$
	0012	$Y = K1 * X1 / X2 + K2$
	0013	$Y = \text{Max}(X1, X2)$ wybierak wartości większej
	0014	$Y = \text{Min}(X1, X2)$ wybierak wartości mniejszej
	0015	$Y = K1 * X1 + X2 + K2$
0016	$Y = K1 * X1 - X2 + K2$	

Funkcje arytmetyczne wejść regulatora stanowią zbiór najczęściej wykorzystywanych w zastosowaniach przemysłowych przekształceń arytmetycznych, realizujących liniową interpretację zdarzeń nieliniowych oraz normalizację zmiennych do skali uniwersalnej 0,000 do 1,000. Wiele sygnałów obiektowych przetwarzana jest bezpośrednio przy „pomiarze”, na sygnały standardowe 4...20mA, 1...5V, itp. W przypadku kiedy czujnik wielkości mierzonej ma charakterystykę odcinkowo-nieliniową (w różnych przedziałach zakresu pomiarowego występują różne kształty charakterystyki, wtedy istnieje konieczność zastosowania specjalnych wielomianów aproksymacji odcinkowej.

Przykładem tego rodzaju czujników są termoelementy zwane popularnie termoparami. Są to czujniki temperatury wykorzystujące zjawisko Seebecka, polegające na powstawaniu siły termoelektrycznej pomiędzy spoiną dwóch różnych metali, a tzw. „zimnymi końcami”. W regulatorze LB-600 wbudowano procedury wielomianowe dla wszystkich rodzajów termoelementów.

Tablica 5.11 Zestaw rodzajów termoelementów obsługiwanych przez regulator LB- 600

<p>1 x 13</p> <p>x = 1...A</p>	Rodzaj sygnału wejściowego:	
	0000	wejście prądowe lub napięciowe - standard,
	0001	wejście temperaturowe - czujnik Pt100,
	0002	wejście temperaturowe - czujnik Pt1000,
	0003	wejście temperaturowe - termoelement (termopara) „J”,
	0004	wejście temperaturowe - termoelement (termopara) „K”,
	0005	wejście temperaturowe - termoelement (termopara) „S”,
	0006	wejście temperaturowe - termoelement (termopara) „R”,
	0007	wejście temperaturowe - termoelement (termopara) „N”,
	0008	wejście temperaturowe - termoelement (termopara) „E”,
	0009	wejście temperaturowe - termoelement (termopara) „B”,
	0010	wejście temperaturowe - termoelement (termopara) „T”,
0011	charakterystyka użytkownika	

W tab. 5.11 przedstawiono kody odpowiadające poszczególnym termoelementom, które należy wpisać do pamięci pod adres 1x13, gdzie x oznacza numer wejścia regulatora.

W tab. 5.12 – 5.14 przedstawiono przykładowe trzy typy termoelementów wraz z wielomianami aproksymującymi ich charakterystyki [PN1]. Termoelementy zbudowane w oparciu o wolfram czy platynę (typ R, B, S) służą do pomiarów bardzo wysokich temperatur do ok. 2000°C. Natomiast najbardziej popularne to termoelementy typu J i K.

Tablica 5.12 Wielomiany dla termoelement R (PtRh13-Pt) – zakres temperatury -50 ... 1768,1 °C

w zakresie temperatur -50 ... 1064,18 °C	$E = \sum_{i=1}^9 a_i t^i$ [μV]	$a_1 = 5,28961729765$ $a_2 = 1,39166589782 \times 10^{-2}$ $a_3 = -2,38855693017 \times 10^{-5}$ $a_4 = 3,56916001063 \times 10^{-8}$ $a_5 = -4,62347666298 \times 10^{-11}$ $a_6 = 5,00777441044 \times 10^{-14}$ $a_7 = -3,73105886191 \times 10^{-17}$ $a_8 = 1,57716482367 \times 10^{-20}$ $a_9 = -2,81038625251 \times 10^{-24}$
w zakresie temperatur 1064,18 ... 1664,5 °C	$E = \sum_{i=1}^5 a_i t^i$ [μV]	$a_0 = 2,95157925316 \times 10^3$ $a_1 = -2,52061251332$ $a_2 = 1,59564501865 \times 10^{-2}$ $a_3 = -7,64085947576 \times 10^{-6}$ $a_4 = 2,05305291024 \times 10^{-9}$ $a_5 = -2,93359668173 \times 10^{-13}$
w zakresie temperatur 1664,5 ... 1768,1 °C	$E = \sum_{i=1}^4 a_i t^i$ [μV]	$a_0 = 1,52232118209 \times 10^5$ $a_1 = -2,68819888545 \times 10^2$ $a_2 = 1,71280280471 \times 10^{-1}$ $a_3 = -3,45895706453 \times 10^{-5}$ $a_4 = -9,34633971046 \times 10^{-12}$

Tablica 5.13

Wielomiany dla termoelement K (NiCr - NiAl) – zakres temperatury -270 ... 1372 °C

w zakresie temperatur – -270 ... 0 °C	$E = \sum_{i=1}^{10} a_i t^i$ [μV]	$a_1 = 3,9450128025 \times 10$ $a_2 = 2,3622373598 \times 10^{-2}$ $a_3 = -3,2858906784 \times 10^{-4}$ $a_4 = -4,9904828777 \times 10^{-6}$ $a_5 = -6,7509059173 \times 10^{-8}$ $a_6 = -5,7410327428 \times 10^{-10}$ $a_7 = -3,1088872894 \times 10^{-12}$ $a_8 = -1,0451609365 \times 10^{-14}$ $a_9 = -1,9889266878 \times 10^{-17}$ $a_{10} = -1,6322697486 \times 10^{-20}$
w zakresie temperatur – 0 ... 1372 °C	$E = b_0 + \sum_{i=1}^9 b_i t^i + c_0 \exp[c_1(t - 126,9686)^2]$ [μV]	$b_0 = -1,7600413686 \times 10$ $b_1 = 3,8921204975 \times 10$ $b_2 = 1,8558770032 \times 10^{-2}$ $b_3 = -9,9457592874 \times 10^{-5}$ $b_4 = 3,1840945719 \times 10^{-7}$ $b_5 = -5,6072844889 \times 10^{-10}$ $b_6 = 5,6075059059 \times 10^{-13}$ $b_7 = -3,2020720003 \times 10^{-16}$ $b_8 = 9,7151147152 \times 10^{-20}$ $b_9 = -1,2104721275 \times 10^{-23}$ $c_0 = 1,185976 \times 10^2$ $c_1 = -1,183432 \times 10^{-4}$

Tablica 5.14

Wielomiany dla termoelement J (Fe - CuNi) – zakres temperatury -210 ... 1200°C

w zakresie temperatur – -210 ... 760 °C	$E = \sum_{i=1}^8 a_i t^i$ [μV]	$a_1 = 5,0381187815 \times 10^1$ $a_2 = 3,0475836930 \times 10^{-2}$ $a_3 = -8,5681065720 \times 10^{-5}$ $a_4 = 1,3228195295 \times 10^{-7}$ $a_5 = -1,7052958337 \times 10^{-10}$ $a_6 = 2,0948090697 \times 10^{-13}$ $a_7 = -1,5631725697 \times 10^{-16}$ $a_8 = 1,5631725697 \times 10^{-20}$
w zakresie temperatur – 760 ... 1200 °C	$E = \sum_{i=1}^5 a_i t^i$ [μV]	$a_0 = 2,9645625681 \times 10^5$ $a_1 = -1,4976127786 \times 10^3$ $a_2 = 3,1787103924$ $a_3 = -3,1847686701 \times 10^{-3}$ $a_4 = 1,5720819004 \times 10^{-6}$ $a_5 = -3,0691369056 \times 10^{-10}$

Najbardziej jednak popularnym czujnikiem do pomiaru temperatury jest termorezystor platynowy Pt100, Pt500 czy Pt1000. [PN2] podaje równania do obliczenia wartości temperatury dla zmierzonej wartości rezystancji czujnika. Ponieważ rezystancja jest wielkością znaczącą, stosuje się tzw. układy czteroprzewodowe, gdzie następuje całkowita kompensacja wpływu dodatkowej rezystancji przewodów łączących czujnik z miernikiem.

Charakterystyka termometryczna termorezystora Pt100:

dla zakresu temperatur -200°C do 0°C

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3]$$

dla zakresu temperatur 0°C do 850°C

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

Gdzie: R_t – rezystancja czujnika w temperaturze mierzonej

R_0 – rezystancja czujnika w temperaturze odniesienia 0°C

oraz współczynniki równań: $A = 3,9083 \times 10^{-3} [^\circ\text{C}^{-1}]$; $B = 5,775 \times 10^{-7} [^\circ\text{C}^{-2}]$;

$C = -4183 \times 10^{-12} [^\circ\text{C}^{-4}]$

Zastosowanie czujników Pt1000 jest uzasadnione, dziesięciokrotnie mniejszymi błędami wynikającymi z nieliniowości czujnika, niż w przypadku czujnika Pt100.

Regulator LB-600 posiada wbudowane procedury linearyzacji odcinkowej dla czujników Pt100 i Pt1000.

Tak więc, funkcje arytmetyczne w jakie wyposażony jest regulator LB-600 umożliwiają kształtowanie charakterystyk zdefiniowany dla poszczególny rodzajów czujników, wpisanie tzw. charakterystyk użytkownika lub tworzenie innych operacji arytmetycznych, specyficznych dla sterowanego procesu technologicznego. Po przejściu przez proces linearyzacji i normalizacji, zmienne obiektowe stają się zmiennymi wewnętrznymi i zanim zostaną przetworzone przez algorytmy, aby stać się zmiennymi wyjściowymi, sterującymi, mogą być poddane dalszej obróbce arytmetycznej. Regulator dostarcza 60 funkcyj arytmetyczno-logicznych, które mogą być dowolnie wykorzystywane. Tab. 5.15 przedstawia funkcje arytmetyczne dwu zmiennych X1 i X2, które pochodzą z wyjść funkcyj tworzących struktur sterowania.

Tablica 5.15 Funkcje arytmetyczne dwóch zmiennych

3 x 13 4 5 6 x = 1 ... F	<u>Algorytmy funkcji dwu zmiennych:</u>
	0001 $Y = X1$
	0002 $Y = K2+(K1*X1+X2)/(K1+1)$
	0003 $Y = K2+(K1*X1-X2+1)/(K1+1)$
	0004 $Y = K1*X1*X2+K2$
	0005 $Y = K1*X1/X2+K2$
	0006 $Y = \text{Max}(X1, X2, X3, X4)$ wybierak wartości największej
	0007 $Y = \text{Min}(X1, X2, X3, X4)$ wybierak wartości najmniejszej
	0008 $Y = K1*X1+X2+K2$
	0009 $Y = K1*X1-X2+K2$
	0010 $Y = K1*100$
0011 $Y = X1^{K1}$	

5.11 Funkcje logiczne

Regulator LB-600 umożliwia również realizację funkcji logicznych, które z kolei służą do realizacji wszelkiego typu uwarunkowań typu „if..... then”, blokad pewnych działań w przypadku alternatywnego lub koniunkcyjnego współdziałania stanów alarmowych, przełączania zmiennych, bądź sterowań w zależności od logicznego wyniku działania funkcji, itp. Każdy z funkcyj realizujących funkcje logiczne posiada cztery wejścia i jedno wyjście. Łączenie wyjścia funkcyj, z jednym z wejść następnego itd., umożliwia realizację funkcji logicznych większej liczby zmiennych. Oprócz klasycznych funkcji algebry Boole’a, możliwa jest realizacja funkcji przerzutnika RS (podstawowy element pamięciowy) oraz kluczy binarnych przełączających na wyjście funkcyj sygnał X1 lub X2 w zależności od stanu logicznego sterującego kluczem. W tab. 5.16 przedstawiono wszystkie funkcje logiczne realizowane przez regulator LB-600.

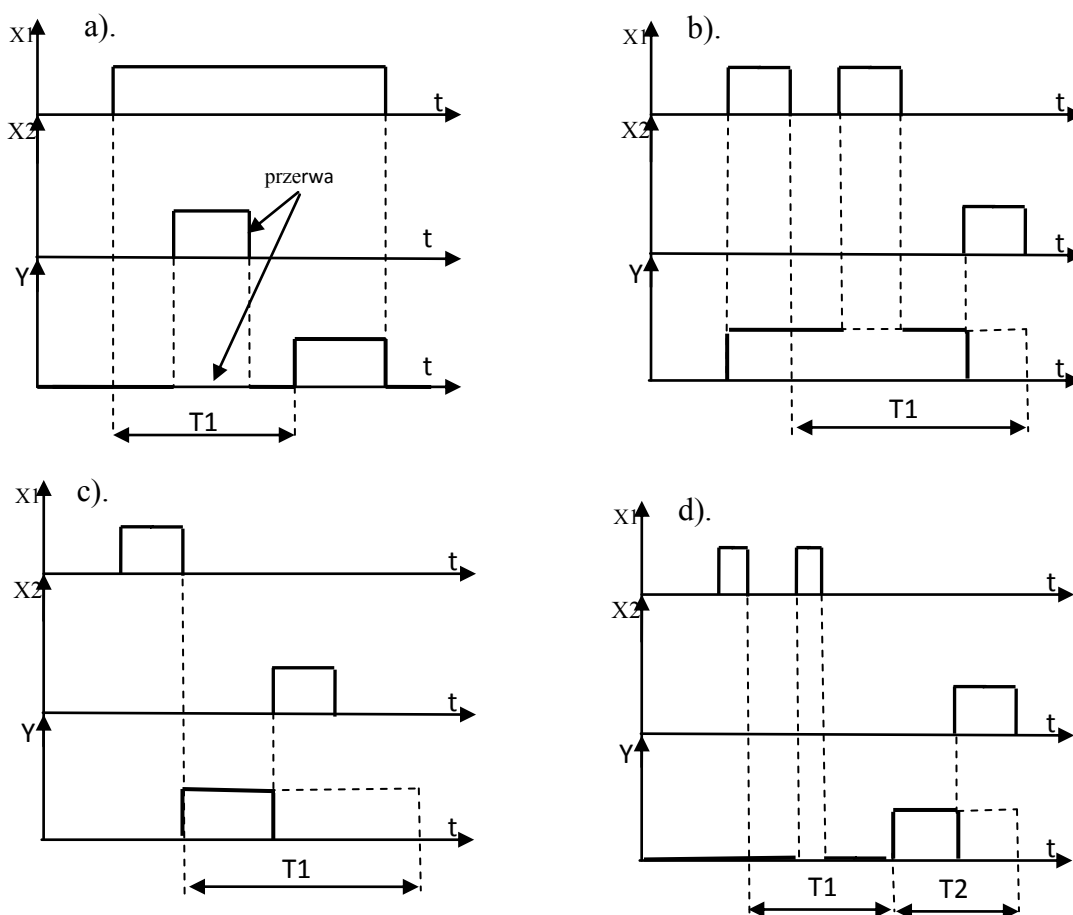
Tablica 5.16 Funkcje logiczne realizowane przez przyrząd LB-600

OR	$Y = X1 \oplus X2 \oplus X3 \oplus X4$
AND	$Y = X1 \otimes X2 \otimes X3 \otimes X4$
NOT	$Y = \overline{X1}$
EXCLUSIVE OR	$Y = \overline{X1}X2 \oplus X1\overline{X2}$
EXCLUSIVE NOR	$Y = X1X2 \oplus \overline{X1}\overline{X2}$
NOR	$Y = \overline{X1 \oplus X2 \oplus X3 \oplus X4}$
NAND	$Y = \overline{X1 \otimes X2 \otimes X3 \otimes X4}$
ZERO logiczne	$Y = 0$
JEDYNKA logiczna,	$Y = 1$
INHIBIT	$Y = \overline{X1} \otimes X2$
IMPLICATION	$Y = \overline{X1} \oplus X2$
Przerzutnik RS	
Bramka logiczna	<i>jeżeli $X1 \geq 0,0$ to $Y = 0,0$</i> <i>jeżeli $X1 < 0,0$ to $Y = 1,0$</i>
Klucz binarny I	<i>jeżeli $RSB = 0$ to $Y = X2$</i> <i>jeżeli $RSB = 1$ to $Y = X1$</i>

Klucz binarny II	<i>jeżeli stan logiczny funkтора (1 ... 60) = 0 to $Y = X2$</i> <i>jeżeli stan logiczny funkтора (1 ... 60) = 1 to $Y = X1$</i>
------------------	--

5.12 Funkcje czasowe i licznikowe

Bardzo ważnym elementem sterowania dynamicznego jest realizacja funkcji czasowych, które oprócz klasycznych opóźnień odpowiedzi w stosunku do wymuszenia, użyteczne są w tworzeniu dyskryminatorów czasowych, funkcji warunkowych, realizacji funkcji generatorów z parametrami czasowymi ustawionymi na stałe, bądź zależnymi od zmiennych obiektowych, itp. W bibliotece funktorów arytmetyczno-logicznych oferowanych przez oprogramowanie regulatora LB-600, występują cztery rodzaje funkcji czasowych, zwanych „timerami”. Każdy z timerów posiada dwa wejścia binarne $X1$ i $X2$ oraz jedno wyjście Y . $X1$ jest wejściem pobudzającym, $X2$ – wstrzymującym. Na wyjściu Y uzyskuje się zmianę stanu logicznego, stan aktywny to 1. Na rys. 5.24a, przedstawiono wykres czasowy dla układu czasowego zwanego w dokumentacji regulatora LB-600 – TIMER 1. Zmiana stanu sygnału $X1$ uruchamia odliczanie czasu $T1$, po upływie którego, wyjście Y zmienia stan na 1 i stan ten trwa aż do zmiany stanu $X1$ na 0. Odmierzanie czasu $T1$ może być wstrzymane na okres aktywności sygnału $X2$.



Rys. 5.24 Wykresy czasowe a) Timer 1; b) Timer 2; c) Timer 3 i d) Timer 4

Pozostałe trzy układy czasowe różnią się szczegółami, które przedstawiono na rys. 5.24 b, c i d. Układy czasowe wymagają zadeklarowania wejść X1 i X2 oraz wartości czasów T1 i T2. Zakres nastawiania czasów T1 i T2 zawiera się w granicach od $5 \cdot 10^{-1}$ do 10^8 s. Piątym układem czasowym zwanym TIMER 5 jest generator o ustawianym okresie T2 oraz czasie trwania impulsu T1. Zmiana stanu wejścia X1 z 0 na 1 powoduje start pracy generatora, zmiana z 1 na 0 zatrzymuje generator.

Oprócz układów czasowych bardzo ważnymi elementami stosowanymi w układach sterowania i regulacji są liczniki impulsów. W regulatorze LB-600 zaimplementowana została funkcja licznika rewersyjnego. Licznik zlicza impulsy podawane z wejścia binarnego, funkto-
ra logicznego bądź rejestru RSB adresowanego w 3, 4, 5, 6-x-01 i 3, 4, 5, 6-x-02 – sygnał X1.

Zmiana kierunku zliczania (rewersowanie licznika) dokonywana jest sygnałem logicznym adresowanym w 3, 4, 5, 6-x-05 i 3, 4, 5, 6-x-06 – sygnał X3, a zerowanie licznika sygnałem logicznym adresowanym w 3, 4, 5, 6-x-03 i 3, 4, 5, 6-x-04 – sygnał X2. Funktory realizujące funkcję licznika można łączyć szeregowo. Licznik zlicza impulsy od wartości początkowej ustawianej w 3, 4, 5, 6-x-11, zmieniając stan logiczny wyjścia funkto-
ra (3, 4, 5, 6-x-13) na 1.000, do wartości końcowej ustawionej w 3, 4, 5, 6-x-10, zmieniając stan wyjścia funkto-
ra na 0.000. Maksymalna wielkość zliczana dla każdego funkto-
ra to 9999. Sygnał rewersujący pozwala na zmianę kierunku zliczania w dół (odliczanie) od wartości bieżącej do 0.000. Stan 0.000 dla odliczania jest wartością graniczną.

5.13 Funkcje specjalistyczne

Funkcja liniowego narastania sygnału w czasie.

Pewne procesy technologiczne wymagają specjalnego zadawania parametrów w funkcji czasu. Takie funkcje można realizować przy wykorzystaniu regulacji programowej (program czasowy – rozdz. 5.7) lub przy wykorzystaniu funkcji liniowego narastania sygnału w czasie.

Funkcja jest realizowana wg. zależności:

$$Y_n = Y_{n-1} + K1 \frac{X1}{K3}$$

Gdzie:

K1 współczynnik nachylenia adresowany w 3, 4, 5, 6-x-14,

X1 zmienna wejściowa (analogowa) adresowana w 3, 4, 5, 6-x-02 i 3, 4, 5, 6-x-03,

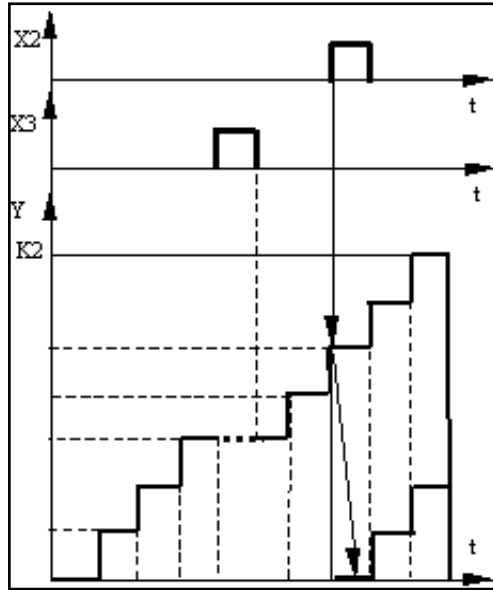
K3 dzielnik (dla $K3 = 600$ – podział 10 sekundowy), adresowany w 3, 4, 5, 6-x-16

oraz nie występujące we wzorze:

X2 zmienna binarna zerująca sygnał wyjściowy, adresowana w 3, 4, 5, 6-x-05 i 3, 4, 5, 6-x-06,

X3 zmienna binarna zatrzymująca narastanie adresowana w 3, 4, 5, 6-x-08 i 3, 4, 5, 6-x-09,

K2 wartość graniczna naliczania adresowana w 3, 4, 5, 6-x-15



Rys. 5.25 Wykres czasowy funkcji liniowego narastania sygnału w czasie

Średnia arytmetyczna

Funktory arytmetyczno-logiczne warstw 3, 4, 5 i 6 posiadają cztery wejścia, które mogą przyjmować zarówno sygnały binarne do realizacji funkcji logicznych, jak i analogowe do realizacji działań arytmetycznych, wybierania największej lub najmniejszej wartości lub do wyliczenia średniej arytmetycznej.

$$Y = \frac{X1 + X2 + X3 + X4}{K3}$$

Łączenie szeregowo funktorów, umożliwia obliczanie średniej arytmetycznej z większej liczby zmiennych wejściowych.

Funkcja integratora.

Funkcję integratora stosuje się do kumulacyjnego zliczania przepływu masowego medium. Pomiar przepływu może być realizowany np. za pomocą zwężki (wielkość X), funkcja integratora generuje określoną zależnością:

$$C_n = K1 \int_0^T x dt, \quad x = 0 \text{ dla } x < K2 * 100\%$$

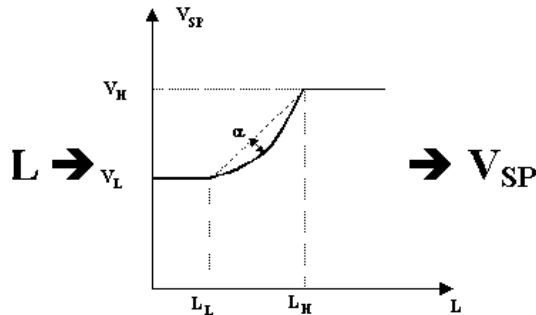
Liczbę impulsów C_n . Impulsy podawane są na licznik np. elektroniczny lub dawniej elektromagnetyczny wyskalowany w odpowiednich jednostkach.

Funkcje „gotowania cukrzycy” typu A i C

Regulatory rodziny EFTRONIK X (poprzednia generacja, pierwowzory regulatora LB-600), w znacznych ilościach obsługiwały cukrownie, gdzie jednym z problemów było zapewnienie odpowiedniego przebiegu procesu gotowania cukrzycy. Opracowano specjalne algorytmy, które zostały przeniesione do regulatora LB-600.

Algorytm gotowania cukrzycy „a”:

- dla $0 \leq L \leq L_L \Rightarrow V_{SP} = V_L$



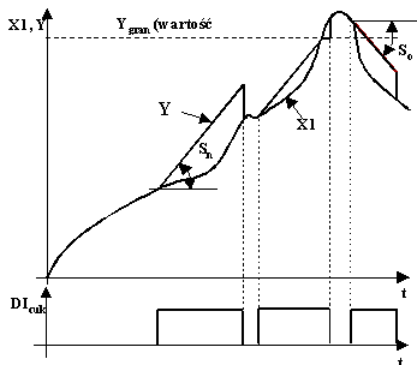
- dla $L_L \leq L \leq L_H$ wg zależności ↓

$$V_{SP} = V_L + \frac{L - L_L}{L_H - L_L} \cdot (1 - \alpha) \cdot (V_H - V_L) + 1 - \alpha \cdot \left(\frac{L - L_L}{L_H - L_L} \right)$$

- dla $L_H \leq L \leq 1.0 \Rightarrow V_{SP} = V_H$

Gdzie: $L_L = K1$ poziom końca stabilizacji;
 $L_H = K2$ poziom kończ gotowania; $V_L = K3$
 lepkość stabilizacji; $V_H = K4$ lepkość stabilizacji; $\alpha = K5$ współczynnik wygięcia krzywej.

Algorytm gotowania cukrzycy „c”:



$S_n = K1$ szybkość narastania; $K2$ współczynnik; $Y_{GRAN} = K3$ zmiana kierunku z narastania na opadanie i odwrotnie.

Funkcje liczników kumulacyjnych dla przepływów

W zbiorze funkcji arytmetycznych warstwy ósmej regulatora występują dwa algorytmy liczników kumulacyjnych służących do zliczania przepływów masowych. Oba liczniki działają wg tej samej zależności. Różnice przedstawiono w uwagach.

LICZNIK 1 $Y = Y + A \cdot (X/600)$ patrz uwaga 1

LICZNIK 2 $Y = Y + A \cdot (X/600)$ patrz uwaga 2

UWAGA 1: licznik 1 liczy do przepelnienia tj. do 9999, a następnie zeruje się i zaczyna liczyć od początku. Alarmy FL i FH działają normalnie zgodnie z definicją. Doliczenie kolejnego przyrostu wartości Y odbywa się co 10 s.

UWAGA 2: licznik 2 liczy do stanu określonego przez FH (generuje impuls dostępny w rejestrze stanów binarnych (147 ... 154), który można wykorzystać np. do uruchomienia buczka, timera itp.), zeruje licznik i liczy od początku. Alarm FL działa normalnie. Doliczenie kolejnego przyrostu wartości Y odbywa się co 10 s.

Funkcje astronomiczne

Regulator LB-600 oprócz swoich możliwości regulacyjnych posiada wiele funkcji sterowniczych. W oparciu o wbudowane funkcje astronomiczne, od paru lat na terenie WIP SGGW

pracuje stacja pyranometryczna – patrz rozdz. 7.1 . Funkcja astronomiczna służy do sterowania urządzeniem sterującym położeniem czujnika pyranometrycznego względem słońca. Funkcja realizowana jest przez trzy funktry: obliczanie elewacji, obliczanie azymutu oraz sterowanie siłownikiem przemieszczającym pyranometr.

OBLICZANIE ELEWACJI - 3,4,5,6-x-13 = 0041

Parametry w:

3,4,5,6-x-14 (K1) – długość geograficzna (longitude)

3,4,5,6-x-15 (K2) – szerokość geograficzna (latitude)

3,4,5,6-x-16 (K3) – czas obliczeń (co ile sekund mają być dokonywane obliczenia)

(dla Warszawy dł. geogr. = 21° ; szer. geogr. = $52,217^{\circ}$)

OBLICZANIE AZYMUTU - 3,4,5,6-x-13 = 0042

Parametry w:

3,4,5,6-x-14 (K1) – długość geograficzna (longitude)

3,4,5,6-x-15 (K2) – szerokość geograficzna (latitude)

3,4,5,6-x-16 (K3) – czas obliczeń (co ile sekund mają być dokonywane obliczenia)

(dla Warszawy dł. geogr. = 21° ; szer. geogr. = $52,217^{\circ}$)

STEROWANIE SIŁOWNIKIEM - 3,4,5,6-x-13 = 0043

Parametry funkcji:

X1 – (3,6,5,6)-x-01, -02 i -03 – źródło sygnału obliczonego w funktorach 3,4,5,6-x-13 = 0041 i/lub 0042,

X2 – źródło pochodzenia impulsów o położeniu siłownika,

K1 - (3,6,5,6)-x-14 – ilość impulsów wynikająca z pełnego przesterowanie siłownika (720 – dla 360° i 180 – dla 90°),

K2 - (3,6,5,6)-x-15 – wprowadza się numer RSB (z grupy Rejestrów specjalnych warstw 3,4,5,6 – 474,...,533) do którego zapisywany jest stan logiczny 0 lub 1 w zależności od kierunku obrotu siłownika elewacji,

K3 – czas konieczny na przesterowanie siłownika w przypadku ustawiania w pozycji wyjściowej (zerowanie ustawień),

K4 - odczyt liczby impulsów dla aktualnego sterowania,

6. Oprogramowanie symulacyjno-konfiguracyjno oraz wizualizacyjne

6.1 Program „Symulator-konfigurator”

Programowanie całych struktur sterowania przy wykorzystaniu pojedynczych parametrów (rejestrów) jest równie uciążliwe, jak programowanie bezpośrednio z pulpitu operatorskiego ze względu na dużą liczbę zmiennych, aczkolwiek ta pierwsza metoda z uwagi na wykorzystanie myszki i ekranu komputera czyni proces programowania bardziej ergonomicz-

nym. Oczywiście w zastosowaniach przemysłowych, gdzie należy szybko zmienić lokalnie jeden lub kilka z parametrów, metoda bezpośrednia (operatorska) jest ze wszech miar uzasadniona.

Znajomość numerów rejestrów oraz typów zmiennych jest również przydatna w SCADA'owskich programach wizualizacyjnych, gdzie tylko istotne zmienne czyli zmienne procesowe biorą udział w procesie wizualizacyjnym, natomiast parametry konfiguracyjne tworzące strukturę sterowania są ustawiane podczas pierwszego jej uruchomienia. Numery rejestrów znajdują się w ostatniej kolumnie tablic konfiguracyjnych, numery rejestrów wyższych kanałów oblicza się wg zamieszczonych w tablicach wzorów.

Zaprogramowanie prostej struktury nie przysparza większych kłopotów, a sprawdzenie poprawności jej działania jest możliwe nawet w sposób intuicyjny. Większość jednakże przypadków to złożone układy sterowania, których struktury zbudowane są z wielu bloków, a analiza poprawności jest bardzo trudna, a czasem niemożliwa w warunkach symulacyjnych. Właśnie dla takich przypadków opracowano⁶ program umożliwiający:

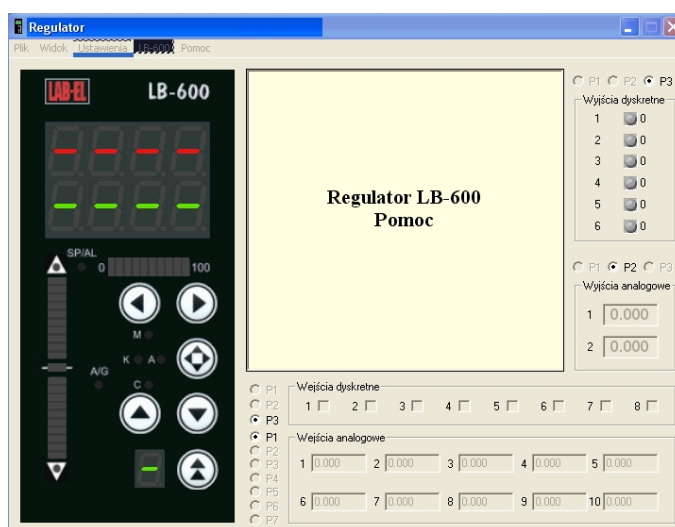
- ◆ programowanie struktury regulacji i/lub sterowania;
- ◆ symulację parametrów wejściowych analogowych i/lub binarnych;
- ◆ odczyt symulacyjny sygnałów wyjściowych analogowych i/lub binarnych;
- ◆ przesyłanie całej struktury do zaadresowanego i podłączonego regulatora;
- ◆ zapis całej struktury w postaci zbiorów: binarnego i tekstowego;
- ◆ graficzne tworzenie struktury z bloków funkcjonalnych;
- ◆ wydruk struktury w postaci „formatki” projektowej.

Wymienione wyżej funkcje realizowane są przez program **Regulator**. Program łączy w sobie funkcje:

- ◆ symulatora – zaprogramowany symulator realizuje rzeczywiste algorytmy i generuje sygnały, które można obserwować na wyjściach;
- ◆ konfiguratora – sprawdzoną i skorygowaną strukturę sterowania wpisuje się do regulatora.

⁶ Założenia techniczne programu i definicje funkcji opracowane przez autora pracy

Program **Regulator** zgłasza się podstawowym ekranem:

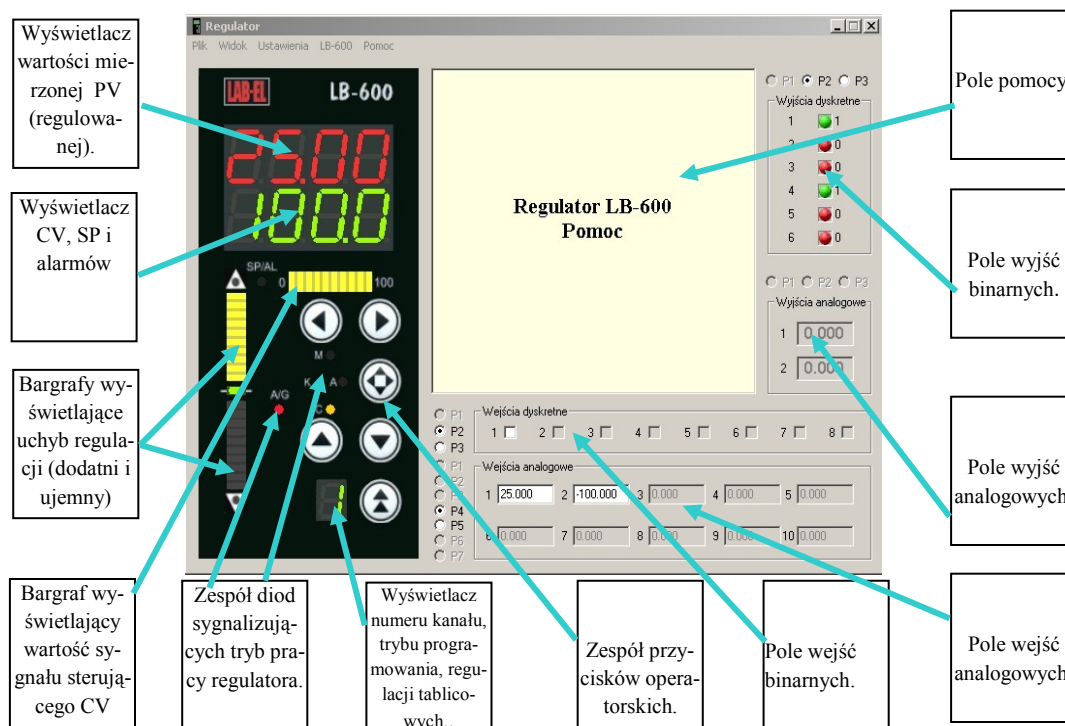


Rys. 6.1 Podstawowy ekran programu Regulator – struktura pusta

Po uruchomieniu program zgłasza się oknem jak na rys. 6.1. Można teraz zrealizować jedną z trzech funkcji:

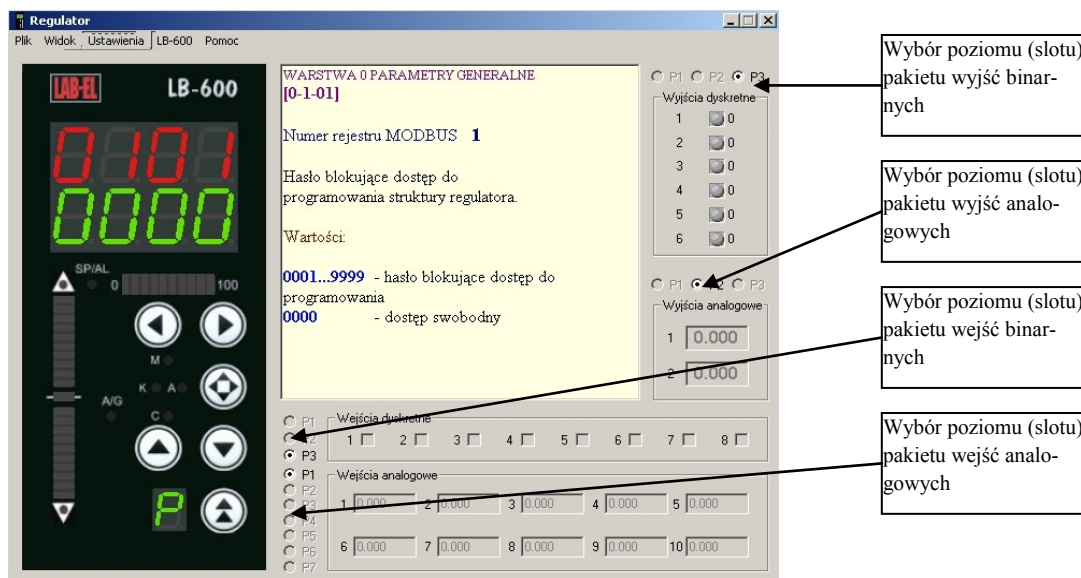
- zaprogramować nową strukturę regulacji i/lub sterowania, posługując się klawiaturą (klawisz SHIFT w na klawiaturze komputerowej wraz z myszką),
- odczytać strukturę z podłączonego do komputera regulatora,
- odczytać strukturę zapisaną w postaci zbioru (<nazwa zbioru.lbp>

Po operacji zapisania do programu struktury, uzyskuje się okno jak na rys. 6.2.



Rys. 6.2 Okno programu Regulator z wczytaną przykładową strukturą

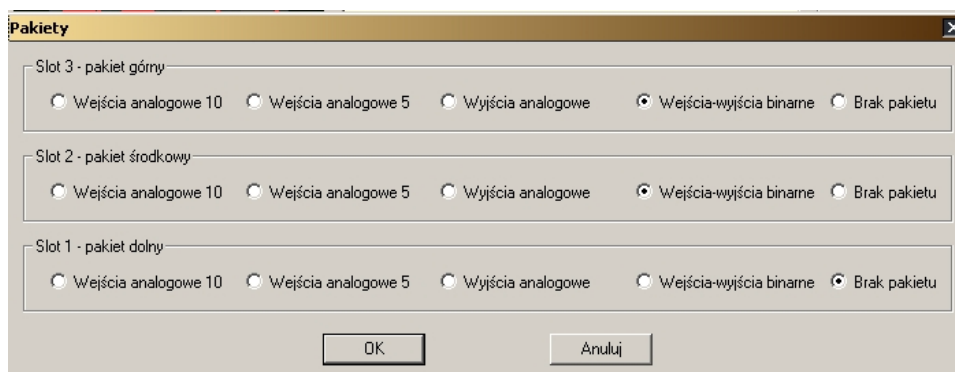
Programowanie struktury przez użytkownika wymaga znajomości funkcji operatorskich, które są identyczne jak w rzeczywistym regulatorze, z tą różnicą, że w regulatorze używa się do niektórych funkcji dwóch przycisków, natomiast w programie **Regulator** używa się klawisza **SHIFT** (klawiatura komputerowa) oraz myszki, którą „klika się” na rysunku odpowiedniego przycisku.



Rys. 6.3 Okno programu Regulator w trybie programowania

Ważną rzeczą jest konfiguracja pakietów umieszczonych w odpowiednich slotach regulatora. W przypadku odczytu struktury z regulatora, konfiguracja pakietów jest zapisana w samej strukturze, w przypadku tworzenia własnej należy ją podać. Ważność tego przypadku jest uzasadniona z uwagi na blokady pewnych funkcji regulatora w zależności od konfiguracji pakietów wejściowo-wyjściowych.

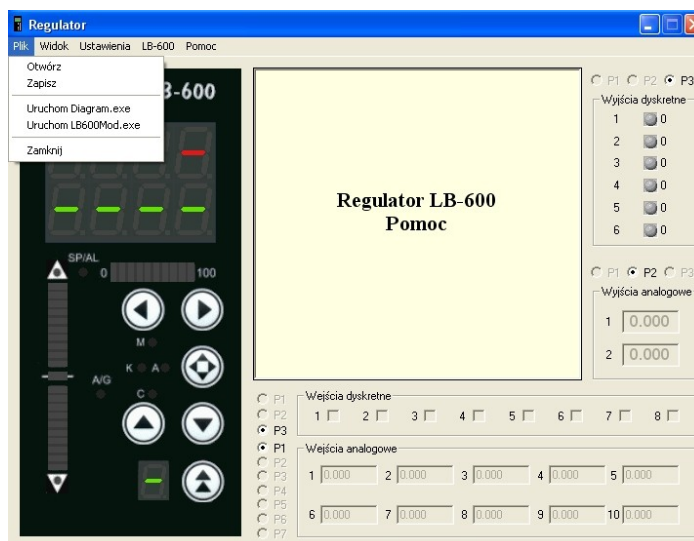
W zakładce **Ustawienia** należy wybrać **Pakiety**, pojawi się okno konfiguracyjne – rys. 6.4., gdzie należy zaznaczyć odpowiedni rodzaj pakietu umieszczony na odpowiednim poziomie regulatora (Slot). Poziomy (sloty) liczy się od dołu, czyli dolny poziom to 1, środkowy – 2, górny natomiast – 3.



Rys. 6.4 Ustawianie kolejności pakietów przy tworzeniu nowej struktury

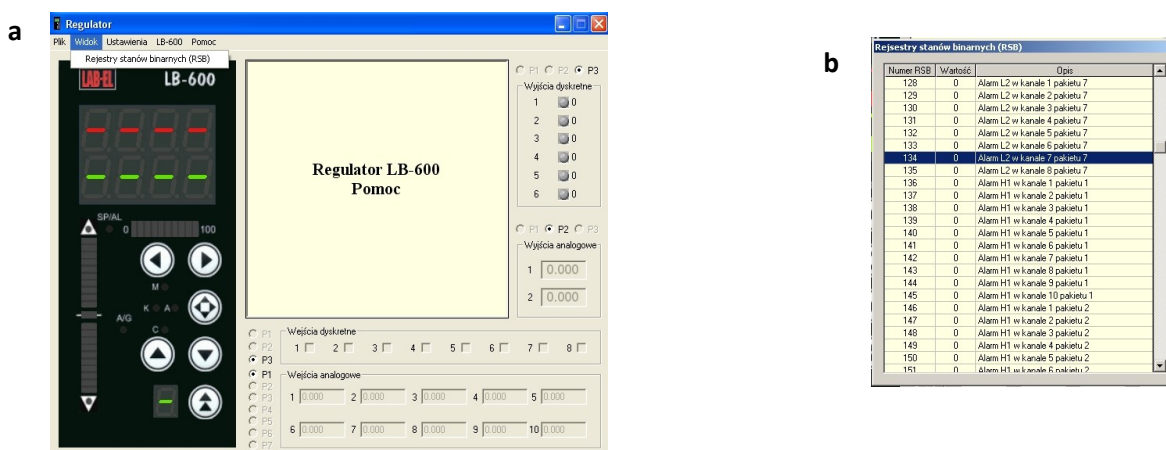
Wprowadzanie struktury ze zbioru do programu **Regulator** odbywa się poprzez **Otwórz** w menu **Plik**, zapisanie struktury z programu, poprzez **Zapisz**.

Z menu **Plik** możliwe jest uruchomienie programu **Diagram** i/lub **LB600Mod**.



Rys. 6.5 Okno programu Regulator do otwierania i zapisywania zbiorów struktur oraz do uruchamiania programów Diagram i LB600Mod

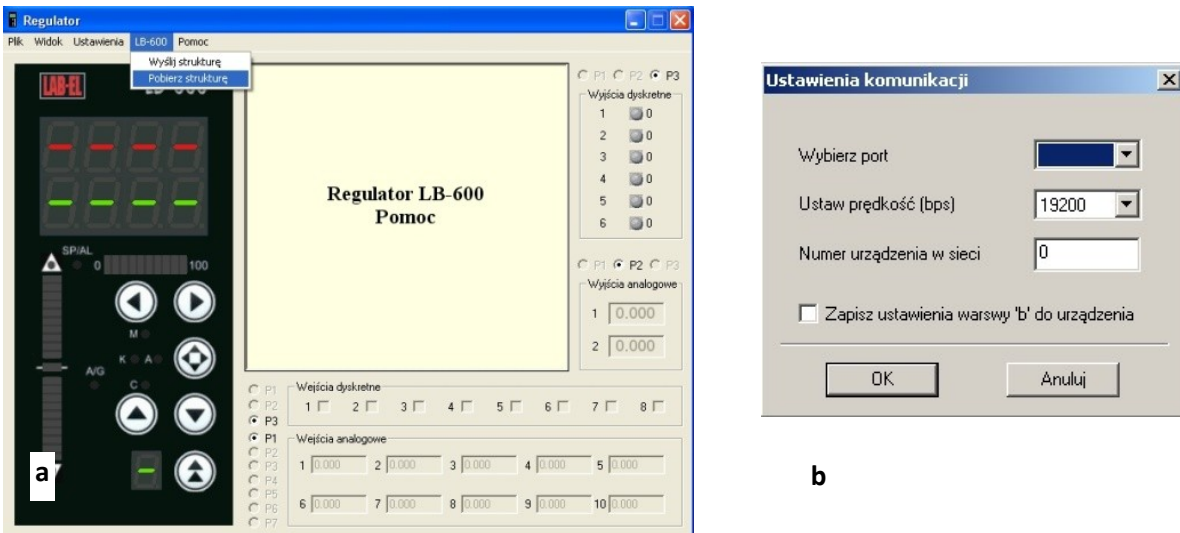
W zakładce **Widok**, można otworzyć okno **Rejestry stanów binarnych (RSB)**, w którym można obejrzeć stany logiczne poszczególnych rejestrów RSB.



Rys. 6.6 Okna umożliwiające podgląd stanów binarnych rejestrów RSB

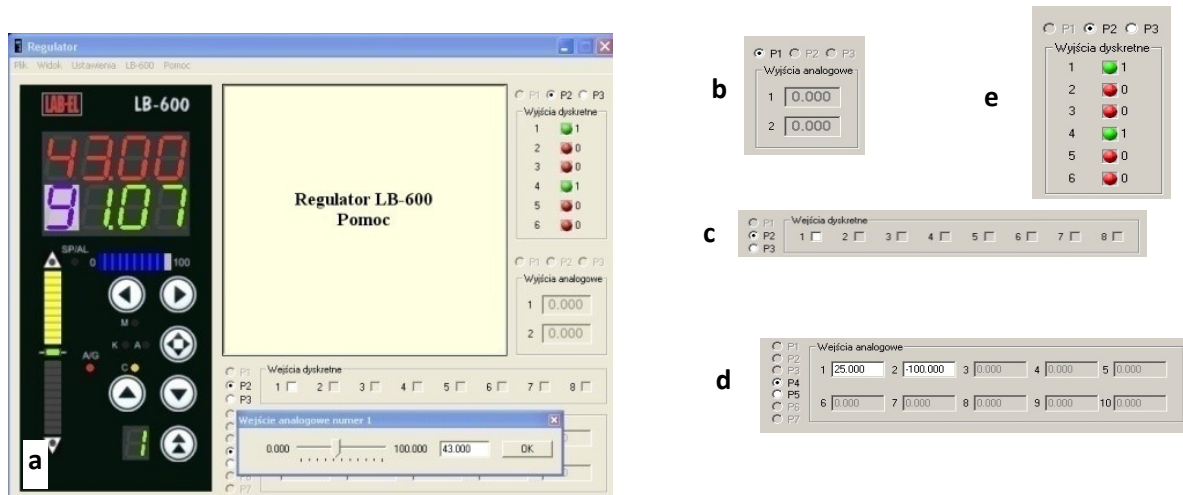
Komunikacja programu z regulatorem odbywa się z memu **LB-600**, skąd można uruchomić zapisywanie struktury do regulatora - **Zapisz strukturę** lub odczytywanie struktury z regulatora – **Pobierz strukturę**. Program pyta o numer portu komunikacyjnego (**Wybierz port**) do którego jest podłączony regulator (dotyczy to przypadku komunikacji RS232, jak i RS485), o prędkość transmisji (**Ustaw prędkość (bps)**), o adres regulatora (zapisany w parametrze 0-1-05 regulatora LB-600) – **Numer urządzenia w sieci** oraz w przypadku funkcji zapisu do re-

gulatora, o zapisanie lub nie zapisywanie parametrów skalujących wejścia i wyjścia analogowe w warstwie „b” (funkcja ta jest nieaktywna w przypadku pobierania struktury z regulatora).



Rys. 6.7 Okno pobierania i zapisywania struktury(a) oraz ustawiana parametrów transmisyjnych (b)

Program **Regulator** jest narzędziem służącym do symulacji działania zaprogramowanej struktury regulacji i/lub sterowania oraz do konfigurowania regulatora poprzez jej przesłanie łączem transmisyjnym. Symulacja działania struktury realizowana jest poprzez symulowane przez program wymuszenia stanów analogowych i/lub binarych..



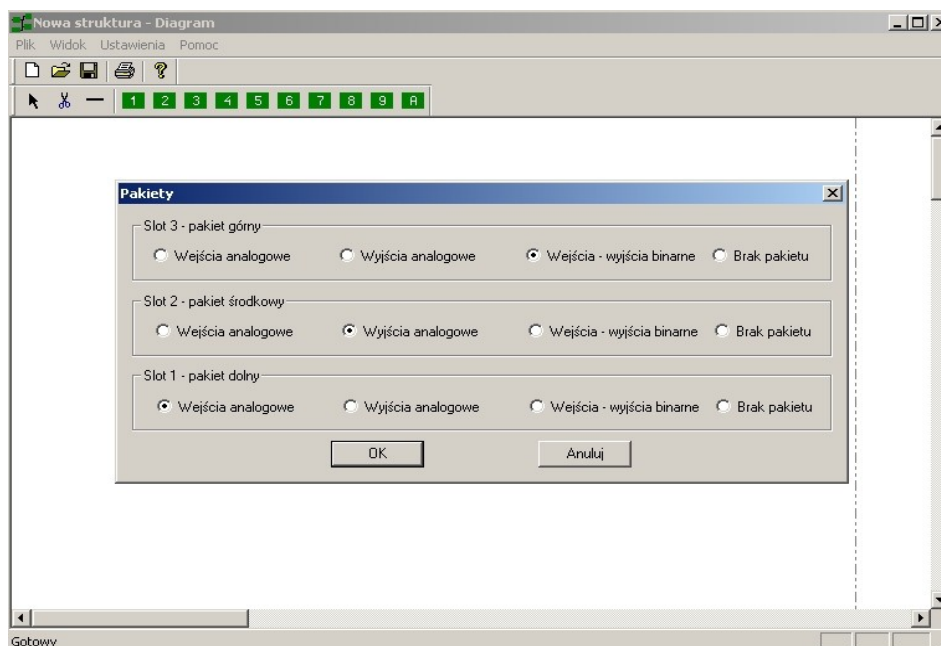
Rys. 6.8 Okno z suwakiem wartości analogowej (a) oraz wycinki dotyczące wymuszeń binarych, konfiguracji pakietów i wskazań stanów wyjść analogowych i binarych (b, c, d i e)

Stany analogowe ustawia się przy pomocy zadajników suwakowych wyskalowanych w skali rzeczywistej wielkości mierzonej – rys. 6.8a. Pola symulacyjne przedstawione na rys. 6.8b, c, d, e, zawierają:

- b. Pole wyświetlania stanu wyjść analogowych w skali 0,000 do 1,000. Wyświetlanie wartości uaktywnia się po procedurze skalowania wyjść analogowych oraz po prawidłowym zaprogramowaniu odpowiednich funktorów warstwy 9. W górnej części znajdują się „wybieraki” pakietów P1, P2 lub P3.
- c. Pole dotyczące wejść binarnych. Poszczególne wejścia uaktywniają się po prawidłowym zaprogramowaniu funktorów warstwy 2. Po lewej stronie – wybieraki pakietów.
- d. Pole wejść analogowych. Wejście uaktywnia się po wyskalowaniu i prawidłowym zaprogramowaniu funktorów warstwy 1. Zakresy wartości wejściowych są zgodne z zaprogramowanymi w warstwie 1. zadawanie wartości analogowej odbywa się po kliknięciu myszką na wyświetlanej wartości odpowiedniego wejścia, skutkiem czego będzie pojawienie się suwaka – patrz rys. 7.8a. Po lewej stronie znajdują się wybieraki pakietów, przy czym P1, P2 i P3 dotyczą faktycznych pakietów wejść analogowych umieszczanych w regulatorze, natomiast P4, P5, P6 i P7 dotyczą kanałów wejściowych dla urządzeń z interfejsem S300.
- e. Pole wyjść binarnych. Diody 1 do 6 sygnalizują stany logiczne wyjść binarnych. Kolorem czerwonym oznaczony jest stan „0”, zielonym natomiast stan „1”. Wyjścia binarne uaktywniają się po prawidłowym zaprogramowaniu funktorów warstwy A. W górnej części znajdują się wybieraki pakietów.

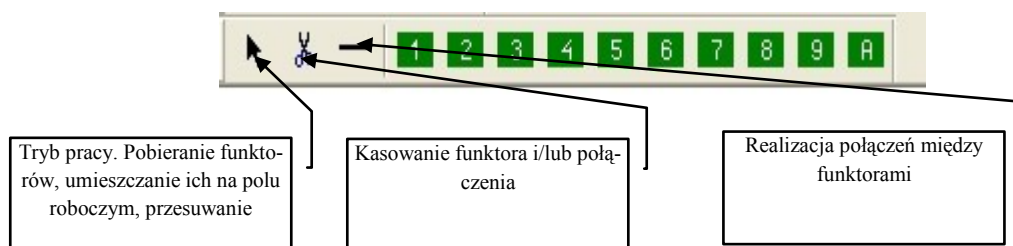
6.2 Program „Diagram”

Program **Diagram** może być uruchomiany niezależnie lub z menu programu **Regulator**. Program służy do tworzenia struktur sterowania i regulacji w postaci graficznej. Podstawowe okno programu przedstawione jest na rys. 6.9



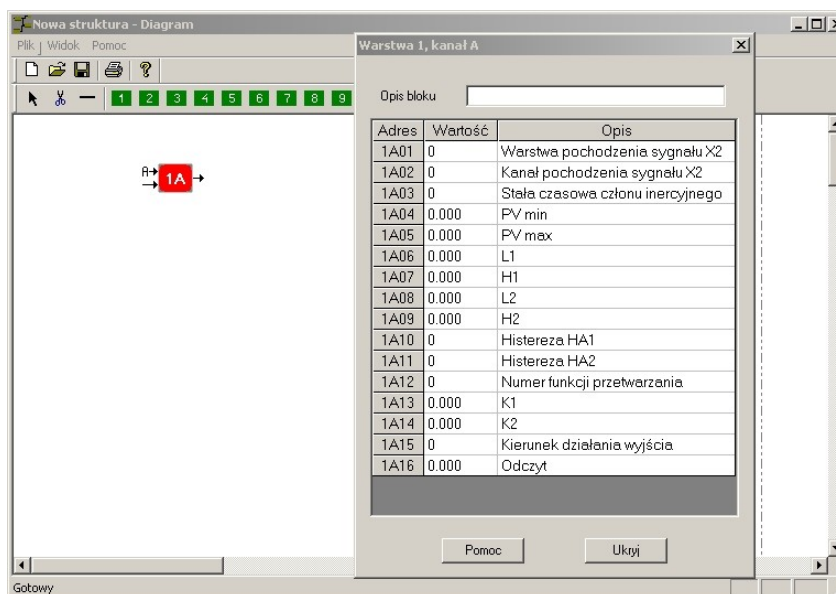
Rys. 6.9 Okno podstawowe programu Diagram, ustawianie lokalizacji pakietów we/wy

Program może tworzyć nowe zbiory-struktury lub otwierać już istniejące, utworzone przez program **Regulator** lub przez program **Diagram**. Zbiory zapisywane i odczytywane przez programy **Regulator** i **Diagram** mają format <nazwa.lbp>. Zbiory struktur zawierają zakodowane informacje o konfiguracji pakietów. W zależności od konfiguracji pakietów, uaktywniane są odpowiednie zasoby bloków funkcjonalnych, np. przy braku pakietów wejść analogowych oraz braku aktywacji kanałów S300, nieaktywne będą zasoby warstwy 1. Aktywność zasobów funkcyjnych sygnalizowana jest kolorem zielonym, brak aktywacji – szarym. Zasoby funkcyjnych wyczerpują się w miarę ich wykorzystywania, wykorzystanie wszystkich funkcyjnych z danej warstwy sygnalizowane jest zamknięciem zasobu (sygnalizacja jak przy braku aktywności – kolor szary)



Rys. 6.10 Biblioteka funkcyjnych oraz narzędzia

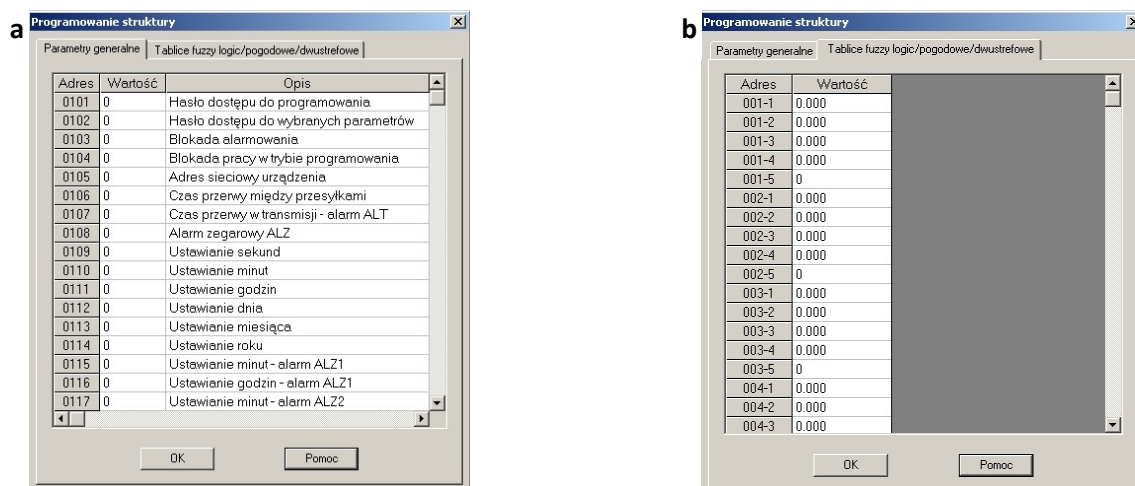
Pobierane z zasobów funkcyjnych są umieszczane na polu roboczym. Parametryzacja funkcyjnych (zapis wartości odpowiednich parametrów) odbywa się w tablicach – patrz rys. 6.11. Otwarcie okna tablicy następuje po kliknięciu myszką na rysunku funkcyjnych. Kody połączeń między funkcyjnymi realizowane są automatycznie po narysowaniu połączenia. Zapis kodów połączeń w tablicy spowoduje wygenerowanie odpowiedniego połączenia na rysunku tworzonej struktury.



Rys. 6.11 Okno pola roboczego tworzonej struktury wraz z tablicą dotyczącą funkcyjnych 1A

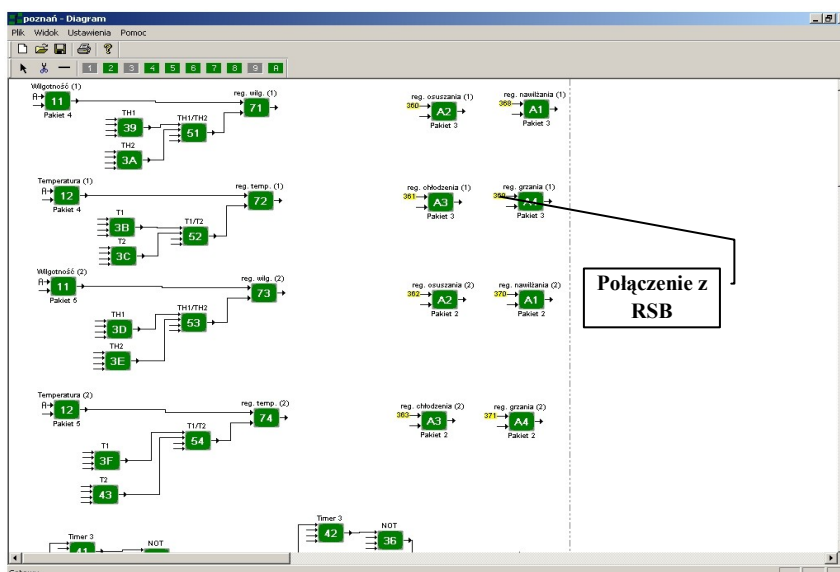
Funktory mogą posiadać różne kolory i tak:

- kolor czerwony posiada funkctor, który nie został prawidłowo zaprogramowany, np. nie ustawiono zakresu pomiarowego;
- kolor szary posiada funkctor nieaktywny – aktywacja funkctora polega na wpisaniu w odpowiednim, przedostatnim parametrze wartości „1”;
- kolor zielony posiada funkctor aktywny i prawidłowo zaprogramowany;
- kolor fioletowy posiadają funkctory warstwy 7, które zaprogramowano jako stacyjki zadawania stosunku lub stacyjki sterowania ręcznego.



Rys. 6.12 Okno programowania parametrów generalnych (warstwa 0) – (a) oraz parametrów regulacji tablicowych (b)

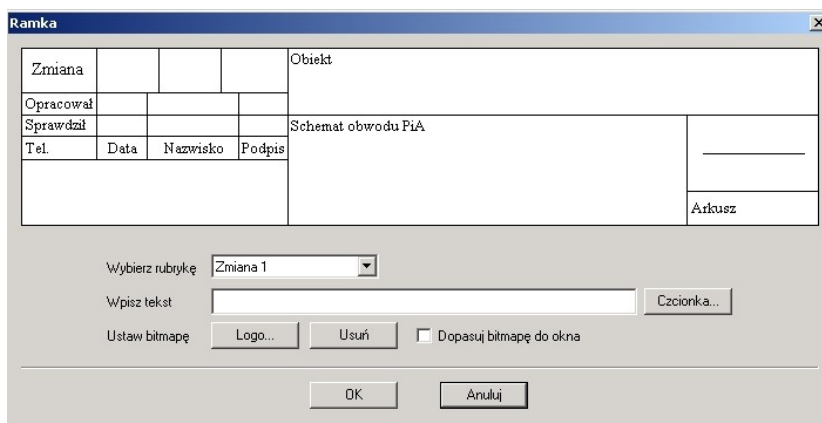
Realizacja struktury przy wykorzystaniu funkctorów dotyczy warstw 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 i A, warstwa skalowania b jest w programie **Diagram** niedostępna (dostępna jest w programie **Regulator**). Dostępna jest natomiast funkcja programowania parametrów generalnych – warstwa 0 oraz programowanie parametrów tablic – patrz rys. 6.12.



Rys. 6.13 Przykładowa struktura sterowania

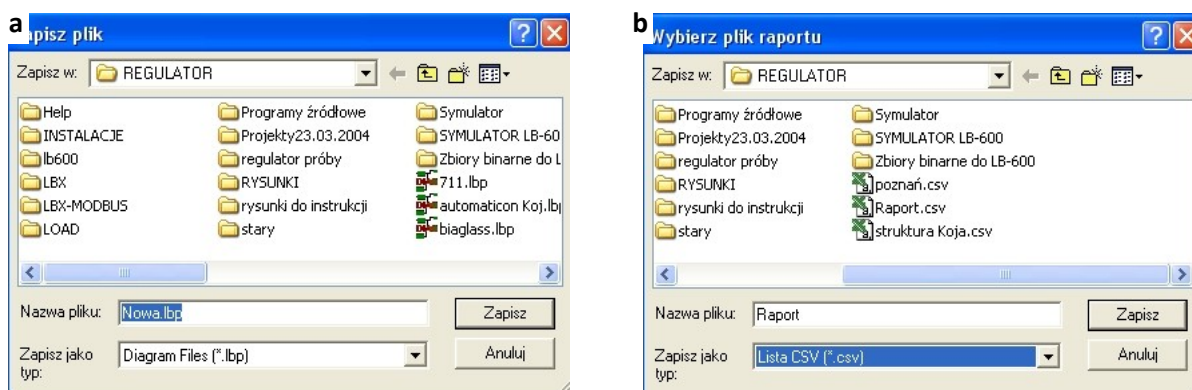
W tablicach do parametryzacji poszczególnych funkktorów, istnieje możliwość zapisania nazwy funkktora lub dowolnej nazwy np. realizowanej funkcji w procesie sterowania. Funktory opisane nazwą oraz połączone można dla przejrzystości rysunku przesuwac w dowolne miejsce nie tracąc połączenia ani opisu. Zakres przesuwania jest ograniczony pewna strefą ochronną wokół funkktorów. W przypadku połączenia wejścia funkktora z rejestrem stanów binarnych (RSB), pojawia się przy danym wejściu funkktora, numer rejestru RSB na żółtym polu, związany trwale z funkktorem.

Utworzona struktura może zostać wydrukowana na tzw. formatce projektowej, dla której generowana jest tabela.



Rys. 6.14 Tabela opisowa

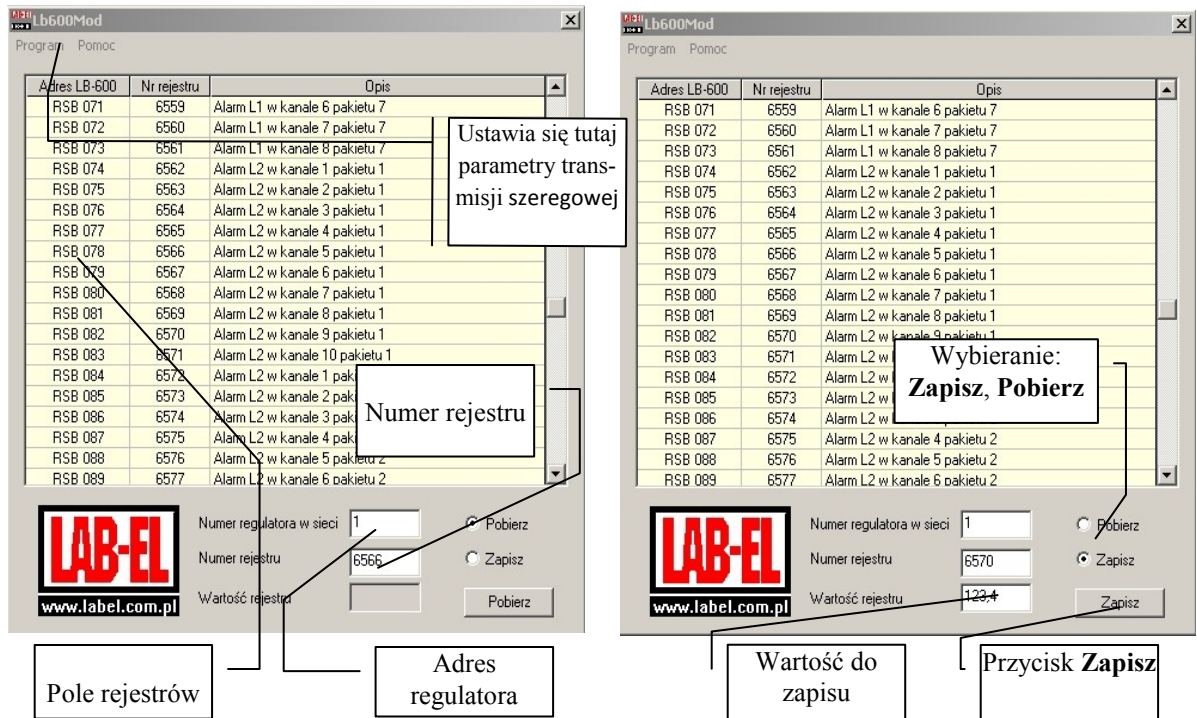
Tabela jest wypełniana przez użytkownika, poprzez wybieranie odpowiedniej rubryki do której wpisywany jest tekst. Możliwe jest dowolne ustawianie czcionki oraz wstawianie własnego firmowego logo. Stworzony zbiór struktury może być zapisany w formacie „lbp”, - **Zapisz jako** lub w postaci raportu - **Zapisz raport**. Zbiory struktur mogą być uruchamiane w programie **Regulator** i odwrotnie, natomiast raporty zapisywane mogą być jako zbiory tekstowe i otwierane przez edytory tekstów lub w postaci plików „csv” do otwierania w programie MsExcel.



Rys. 6.15 Okna zapisu zbioru struktury (a) oraz zbiorów raportów (b)

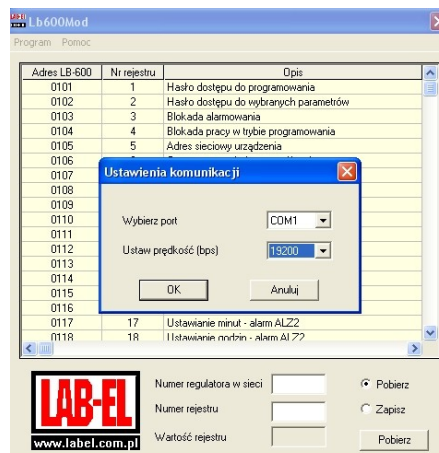
6.3 Program „Rejestr”

Program **Lb600Mod** służy do zapisu i odczytu pojedynczych parametrów regulatora LB-600, mogą to być zmienne procesowe jak i zmienne konfiguracyjne. Program sam rozpoznaje typ zmiennej, tak aby użytkownik nie musiał zastanawiać się czy to wartość zmiennoprzecinkowa (float) czy też całkowita (integer). Program może być uruchamiany samodzielnie lub z menu programu **Regulator**. Na rys. 6.16 przedstawione jest podstawowe okno programu dla funkcji odczytu (**Pobierz**) jak i funkcji zapisywania (**Zapisz**).



Rys. 6.16 Okno robocze programu Lb600Mod

Prawidłowa współpraca programu z regulatorem będzie możliwa po wybraniu odpowiedniego portu transmisji szeregowej oraz prędkości transmisji. Prędkość regulatora ustawia się fabrycznie na 19 200 bodów.



Rys. 6.17 Okienko konfiguracji transmisji (numer portu COM i prędkość transmisji w b/s)

Program Lb600Mod jest tak skonstruowany, że użytkownik nie musi znać numeru rejestru zmiennej, którą chce zapisać lub pobrać, wystarczy zaznaczyć daną zmienną, aby jej numer automatycznie pojawił się w okienku **Numer rejestru**, w oknie roboczym.

Tabl 0264	7356	
Tabl 0265	7358	
Tabl 0271	7360	
Tabl 0272	7362	
Tabl 0273	7364	
Tabl 0274	7366	
Tabl 0275	7368	
Tabl 0281	7370	
Tabl 0282	7372	
Tabl 0283	7374	
Tabl 0284	7376	
Tabl 0285	7378	
Tabl 0291	7380	
Tabl 0292	7382	
Tabl 0293	7384	

Rys 6.18 Fragment okna roboczego z zaznaczoną zmienną Tabl 0271, której numer rejestru to 7360

Użytkownik programu **LB600Mod** uzyskuje dostęp do zapisu/odczytu wszystkich parametrów regulatora, których liczba przekracza 11000 (!). Parametry związane z warstwami 1, 2,9 i A (wejścia analogowe, wejścia binarne, wyjścia analogowe, wyjścia binarne), posiadają identyfikator położenia czyli pozycją pakietu P1, P2 lub P3. W ramach dostępu rejestrów, istnieje możliwość podglądu Rejestru Stanów Binarnych (RSB), tablic do realizacji regulacji czasowych oraz parametrów skalowania warstwy B.

a	P1 1809	342	Wartość alarmu L2
	P1 1810	344	Wartość alarmu H2
	P1 1811	346	Histeresa alarmów HA1
	P1 1812	347	Histeresa alarmów HA2
	P1 1813	348	Rodzaj wejścia
	P1 1814	349	Funkcje arytmetyczne X1 i X2
	P1 1815	350	Współczynnik K1
	P1 1816	352	Współczynnik K2
	P1 1817	354	Logika działania bloku
	P1 1818	355	Blok aktywny
	P1 1819	356	Odczyt wejścia bloku
	P1 1901	370	Pakiet pochodzenia X2
	P1 1902	371	Warstwa pochodzenia X2
	P1 1903	372	Kanał pochodzenia X2
	P1 1904	373	Stała filtracji
	P1 1905	374	Wartość minimalna PV/min
	P1 1906	376	Wartość maksymalna PV/max
	P1 1907	378	Wartość alarmu L1
	P1 1908	380	Wartość alarmu H1

b	RSB 097	6585	Alarm L2 w kanale 4 pakietu 3
	RSB 098	6586	Alarm L2 w kanale 5 pakietu 3
	RSB 099	6587	Alarm L2 w kanale 6 pakietu 3
	RSB 100	6588	Alarm L2 w kanale 7 pakietu 3
	RSB 101	6589	Alarm L2 w kanale 8 pakietu 3
	RSB 102	6590	Alarm L2 w kanale 9 pakietu 3
	RSB 103	6591	Alarm L2 w kanale 10 pakietu 3
	RSB 104	6592	Alarm L2 w kanale 1 pakietu 4
	RSB 105	6593	Alarm L2 w kanale 2 pakietu 4
	RSB 106	6594	Alarm L2 w kanale 3 pakietu 4
	RSB 107	6595	Alarm L2 w kanale 4 pakietu 4
	RSB 108	6596	Alarm L2 w kanale 5 pakietu 4
	RSB 109	6597	Alarm L2 w kanale 6 pakietu 4
	RSB 110	6598	Alarm L2 w kanale 7 pakietu 4
	RSB 111	6599	Alarm L2 w kanale 8 pakietu 4

c	6609	4558	Kanał pochodzenia X3
	6610	4559	Pakiet pochodzenia X4
	6611	4560	Warstwa pochodzenia X4
	6612	4561	Kanał pochodzenia X4
	6613	4562	Algorytm wielu zmiennych
	6614	4563	Współczynnik K1
	6615	4565	Współczynnik K2
	6616	4567	Współczynnik K3
	6617	4569	Współczynnik K4
	6618	4571	Współczynnik K5
	6619	4573	Blok aktywny
	6620	4574	Odczyt wejścia bloku
	6701	4580	Pakiet pochodzenia X1
	6702	4581	Warstwa pochodzenia X1
	6703	4582	Kanał pochodzenia X1

d	b108	11401	Flaga 2
	b207	11404	Flaga 1
	b208	11405	Flaga 2
	b307	11408	Flaga 1
	b308	11409	Flaga 2
	b407	11412	Flaga 1
	b408	11413	Flaga 2
	b507	11416	Flaga 1
	b508	11417	Flaga 2
	b607	11420	Flaga 1

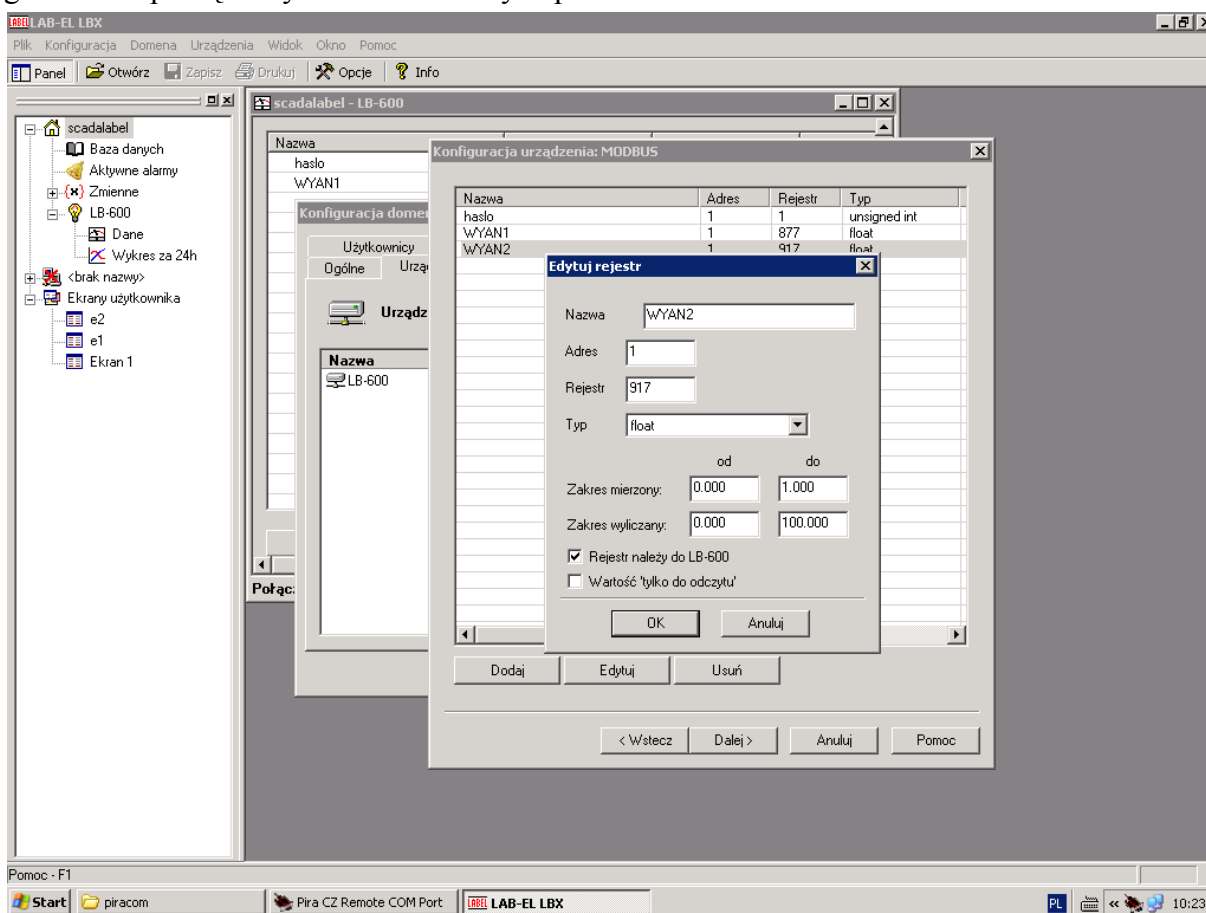
Rys. 6.19 Obszary rejestrów: a) rejestry warstwy 1 (identyfikator pakietów P1); b) rejestry RSB; c) rejestry funkcyjnych; d) rejestry warstwy skalowania wejść/wyjść

Program LB600Mod może być wykorzystany do zmiany jednego lub kilku parametrów podczas pracy regulatora, np. z notebooka, bez konieczności instalacji oprogramowania wizu-

alizacyjnego. Może również służyć do odczytu zapomnianych haseł zabezpieczających strukturę przez dostępem osób niepowołanych.

6.4 Program „LBX”

Program LBX został opracowany w firmie LAB-EL w celu obsługi produkowanych urządzeń kontrolno-pomiarowych z poziomu komputera. Spośród wielu urządzeń obsługiwany jest również regulator LB-600. Program LBX umożliwia współpracę z wieloma regulatorami (do 32) podłączonymi poprzez konwerter RS232/RS485 do portu COMx komputera lub z regulatorami podłączonymi do niezależnych portów .



Rys. 6.20 Okno główne programu, a w nim okno konfiguracji zmiennych regulatora LB-600

Program LBX jest częścią systemu kontrolno-pomiarowego o dowolnej złożoności. Odpowiedzialny jest za komunikację z urządzeniami kontrolno-pomiarowymi oraz stanowi interfejs użytkownika, za pomocą którego prezentowane (wizualizowane) są dane oraz udostępniane są różne mechanizmy sterujące. Program może pracować w dwóch trybach: lokalnym (bez sieci) i zdalnym (przez sieć). Pracując lokalnie, program LBX obsługuje urządzenia bezpośrednio dołączone do komputera - w takim wypadku stanowi on jedną całość bezpośrednio obsługującą urządzenia oraz udostępniającą interfejs użytkownika. Przy pracy zdalnej program podzielony jest na dwie części: serwera i klienta, które zapewniają łączność przez sieć -

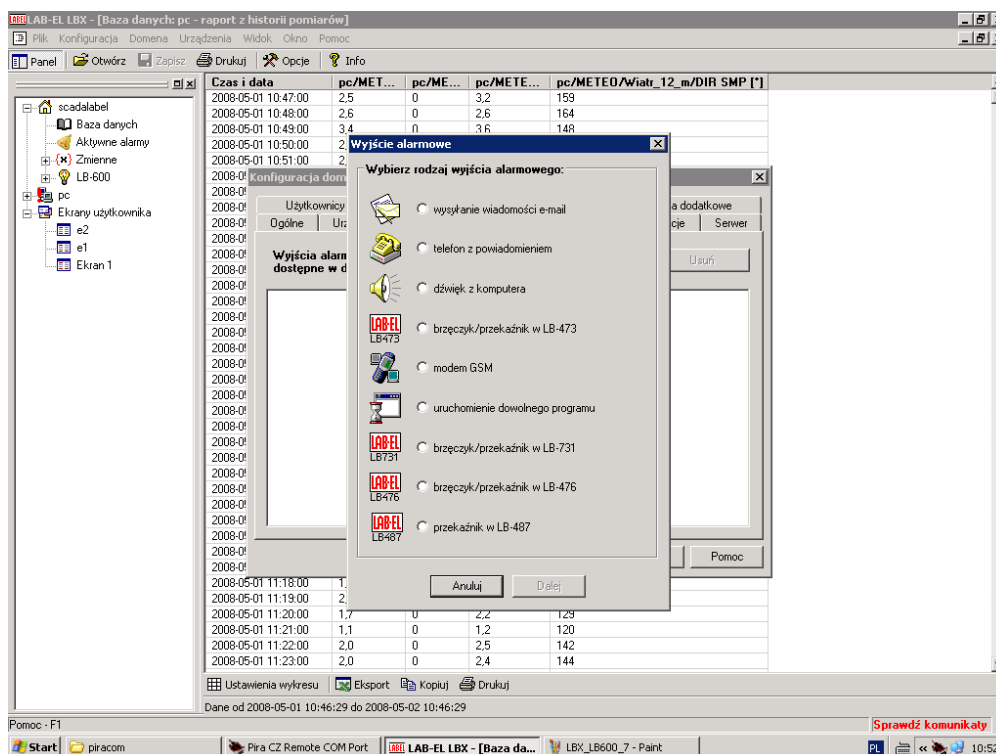
przy pomocy dostępnych mechanizmów komunikacji sieciowej (można z dowolnie odległego miejsca prowadzić podgląd danych i sterować urządzeniami).

Funkcje serwera: komunikacja z dołączonymi urządzeniami, zarządzanie archiwum danych, monitorowanie alarmów i ich sygnalizacja, zapewnienie dostępu dla zdalnych klientów.

Funkcje klienta: komunikacja z serwerem, prezentacja bieżących odczytów z urządzeń, sterowanie urządzeniami - dostęp do nastaw i wszelkich funkcji, prezentacja archiwizowanych danych - wykresy, raporty, histogramy.

Pojedynczy serwer LBX wraz z pulą dołączonych do niego urządzeń stanowi tzw. domenę. Jeden serwer może obsługiwać dowolną ilość dołączonych urządzeń, na ile pozwalają zasoby sprzętowe obecne w komputerze (np. porty szeregowy czy USB). W przypadku systemu działającego zdalnie, serwer umożliwia dostęp dla dowolnej ilości zdalnych klientów, którzy jednocześnie mogą prowadzić swoje działania na jednej domenie. Każdy z klientów może połączyć się z dowolną ilością domen (serwerów LBX), prowadząc jednocześnie kontrolę i sterowanie w zupełnie niezależnych od siebie domenach.

Komunikacja pomiędzy klientem, a serwerem odbywa się za pomocą mechanizmów transportowych sieci komputerowych - typowo jest to protokół TCP/IP. Protokół został zaprojektowany mając na uwadze takie kluczowe cechy jak bezpieczeństwo i integralność przesyłanych danych oraz minimalizacja ilości przesyłanych danych, co pozwala sprawnie działać nawet na łączach o niskiej przepustowości oraz w sieciach WAN. Zastosowane algorytmy aktualizują dane u klienta tylko w momencie ich zmiany na serwerze, bez zbędnej transmisji danych które się w danym czasie nie zmieniają. Dla zabezpieczenia transmisji pomiędzy serwerem i klientem istnieje możliwość wykorzystania szyfrowania – poprzez SSL.



Rys. 6.21 Okno wyboru wyjść alarmowych

Program LBX umożliwia zaprogramowanie wielu sytuacji alarmowych, np. przerwa w torze transmisji danych pomiędzy urządzeniem pomiarowym, a serwerem, brak lub awaria czujnika, przekroczenie zadanych wartości granicznych w urządzeniu zbiorczym (koncentratorze danych) oraz przekroczenie zadanych wartości granicznych w bazie danych. Wszystkie te sytuacje tworzą tzw. stany binarne. Zmiana stanu binarnego z 0 na 1 i odwrotnie, może być zarejestrowana w bazie, w dzienniku zdarzeń oraz może wygenerować powiadomienie np. wysłanie e-maila, SMS-a, automatycznie wybrać numer telefonu i powiadomić głosowo o konkretnym zdarzeniu (voice modem), uruchomić program w komputerze-serwerze, itp. Na rys. 6.21 przedstawiono okno wyboru wyjść alarmowych.

Program LBX obsługuje szeroką gamę urządzeń produkcji firmy LAB-EL, jak również niektórych innych. Lista obejmuje mierniki (LB710, LB711, LB715, LB716, LB746, LB900, LB910, LB905, LB910, LB920), koncentratory/konwertery (LB473, LB476, LB487, LB485, LB486, LB731), regulatory (LB600, LB760A, LB760B, LB760C), stacje meteorologiczne (LB741), modemy GSM różnego typu, konwertery ethernet/serial różnego typu, wszelkie urządzenia z interfejsem MODBUS, kamerę ethernet'ową, przetworniki z interfejsem RS232 produkcji firmy Aplisens.

Otwarta architektura programu pozwala na bardzo łatwe rozszerzenie funkcjonalności o dowolne inne urządzenia.

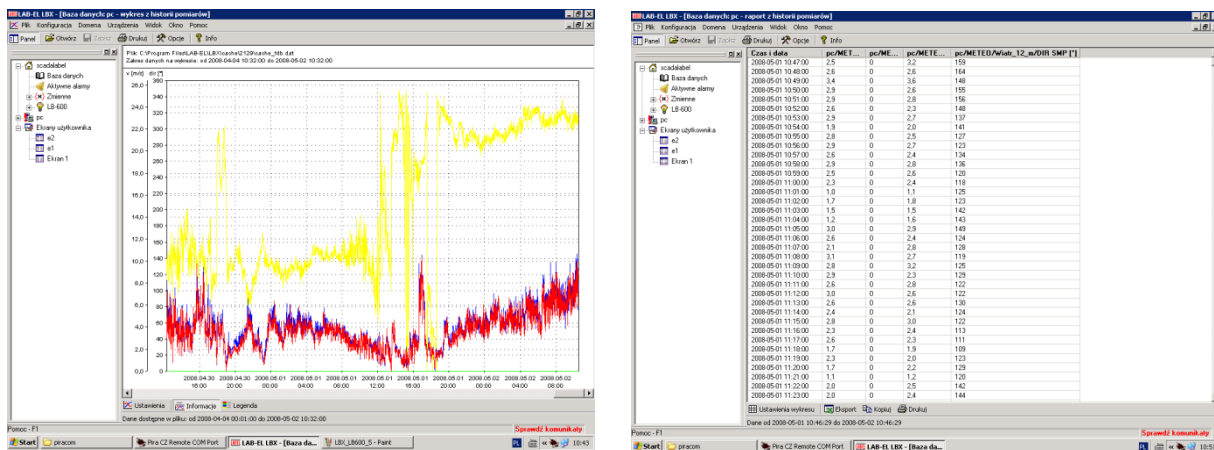
Program tworzy i obsługuje bazę danych, do której trafiają odczyty danych (zmienne) z prowadzonych rejestracji. Baza danych prowadzona jest na serwerze, jednoczesny dostęp do niej ma dowolna ilość klientów. Odczyt danych z bazy danych serwera do klienta jest zoptymalizowany - klient prowadzi swoją kopię roboczą danych, doczytując jedynie te, których mu brakuje. Pozwala to również na dostęp do tych danych po stronie klienta w przypadku braku połączenia z serwerem. Baza danych może zostać skonfigurowana w taki sposób, że przechowywane będą tylko dane nie starsze niż zadany okres czasu, zapobiegając nadmiernej przyrostowi objętości bazy. Dane z bazy mogą być okresowo zapisywane do archiwum, w którym tworzone są pliki archiwalne - do celów archiwizacji na nośnikach trwałych przez użytkownika.

Baza danych i pliki archiwalne mają kontrolę poprawności, pozwalającą wykryć modyfikację plików dokonaną zewnątrz. Dla zapewnienia poufności danych, pliki mogą zostać przez program zaszyfrowane, wymagając przy odczycie znajomości hasła. W celu prezentacji danych z bieżącej bazy danych oraz archiwum, program umożliwia prezentację ich w postaci wykresu, raportu lub histogramu, z szerokimi możliwościami konfiguracji. Dane mogą zostać również wyeksportowane do plików CSV i obrabiane przez MSExcel.

Realizowane przez program funkcje są różne zależnie od typu danego urządzenia, typowy zbiór możliwości jest następujący: monitorowanie poprawności komunikacji, odczyt danych bieżących z urządzenia, synchronizacja czasu w zegarze urządzenia, automatyczny odczyt w tle pamięci rejestracji z urządzenia, okresowa rejestracja danych prowadzona przez program jeśli urządzenie nie ma własnej pamięci rejestracji.

Program przedstawia wszelkie dostępne wartości (wyniki pomiarów, ustawienia, itp) ze wszystkich urządzeń w postaci zmiennych o unikalnych nazwach. Zmienne w tej postaci pod-

legają rejestracji do archiwum danych, gdzie są dostępne do prezentacji w postaci wykresów lub raportów w jednolity sposób niezależnie od źródła pochodzenia. Każdą zmienną można niezależnie podglądać, umieścić na ekranie zbiorczym (użytkownika) w dowolnej konfiguracji z innymi zmiennymi. Dla każdej zmiennej można też ustawić wiele poziomów alarmowania.



Rys. 6.22 Dane zapisane w bazie danych mogą być prezentowane w postaci wykresów lub raportów

Program LBX spełnia podstawowe wymogi norm amerykańskich CFR21 part 11 w zakresie przetwarzania danych w postaci elektronicznej. Zapewnione są: identyfikacja i autoryzacja użytkowników z limitem dostępu do systemu i określonym zakresem uprawnień - za pomocą systemu kont i haseł, generowanie dokładnych i kompletnych kopii archiwalnych danych, kontrola poprawności zbiorów danych (pliki tworzone przez program zawierające dane z rejestracji opatrzone są sumami kontrolnymi np. MD5 lub SHA1, pozwalającymi na weryfikację poprawności i wykrycie ewentualnych ingerencji; pliki danych mogą być opcjonalnie zaszyfrowane przy pomocy algorytmu wybranego przez użytkownika - DES, Blowfish, wtedy do odczytu takiego zbioru potrzebna jest znajomość hasła), rejestracja działań użytkowników systemu, elektroniczne podpisy użytkowników w zbiorach danych w postaci wpisów i komentarzy z sygnaturą użytkownika od którego pochodzi dany wpis.

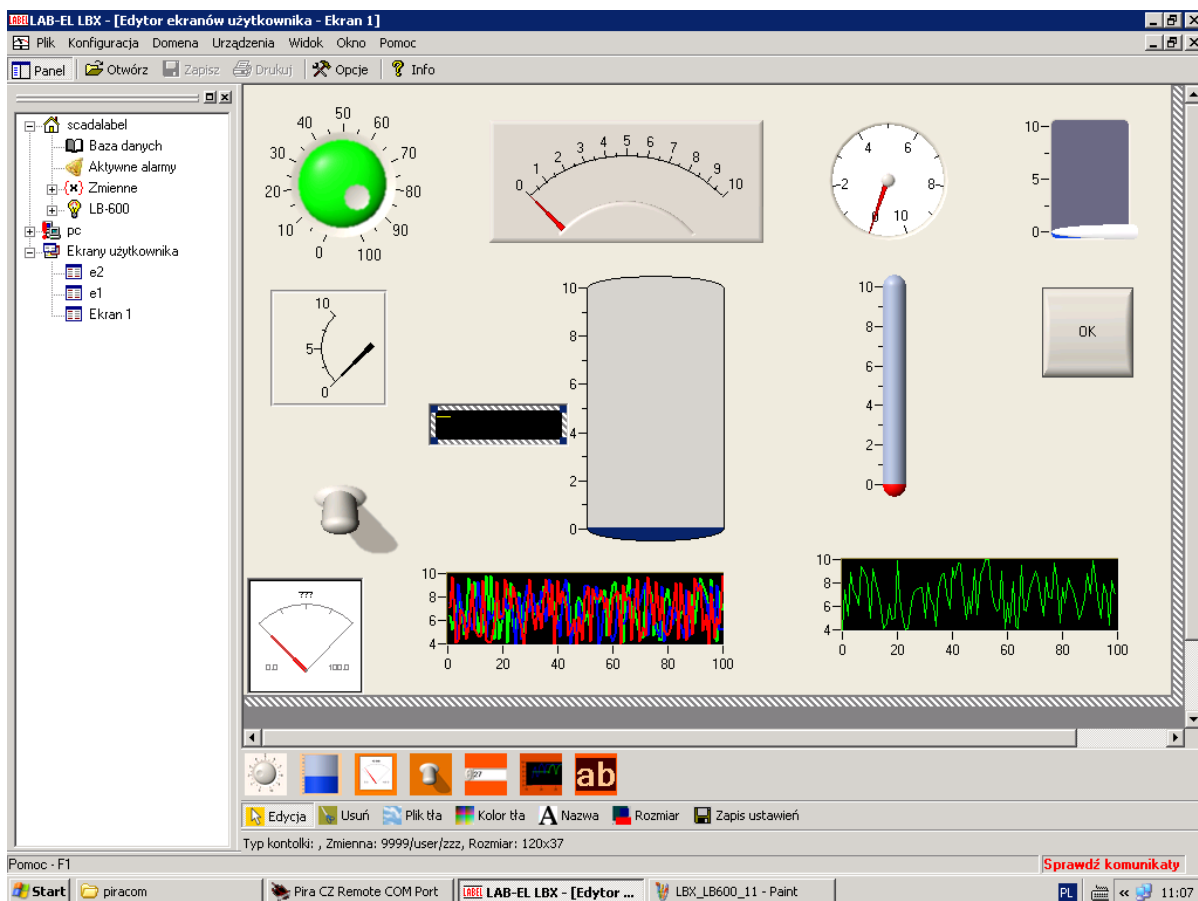
Program umożliwia tworzenie tzw. zmiennych użytkownika („user”) dzięki czemu nazwy zmiennych tworzone automatycznie przez program, stanowiące specyficzny ciąg nazw składający się z nazwy domeny, nazwy przyrządu, nazwy zmiennej, mogą być nazwane wg potrzeb użytkownika. Zmienne mogą być poddawane obróbce arytmetyczno-logicznej, a wyniki tych działań, na życzenie mogą być zapisywane w bazie danych i obrabiane jak normalne zmienne.

Program rejestruje wszystkie zdarzenia w raporcie zdarzeń. Można tam znaleźć informację tym kto i kiedy logował się do system, jakie stany awaryjne zostały zarejestrowane (co i kiedy?), jakie i z jakim skutkiem zostało wysłane powiadomienie, itp.

Ciekawym narzędziem, nawiązującym do oprogramowania typu Scada, jest możliwość tworzenia własnych okien synoptycznych, związanych z prowadzonym procesem technologicznym. Program udostępnia bibliotekę obiektów graficznych, animowanych, które umiesz-

cza się na obrazie synoptycznym procesu w miejscach, gdzie dokonywany jest pomiar, i łączy się je ze zmiennymi procesowymi, które powodują wypełnianie zbiorników, otwieranie zaworów, tworzą wykresy zmiennych w lokalnych węzłach technologicznych, itp.

Na rys. 6.23 przedstawiono przykładowe obiekty synoptyczne jakie użytkownik programu otrzymuje w celu tworzenia tzw. „ekranów użytkownika”.



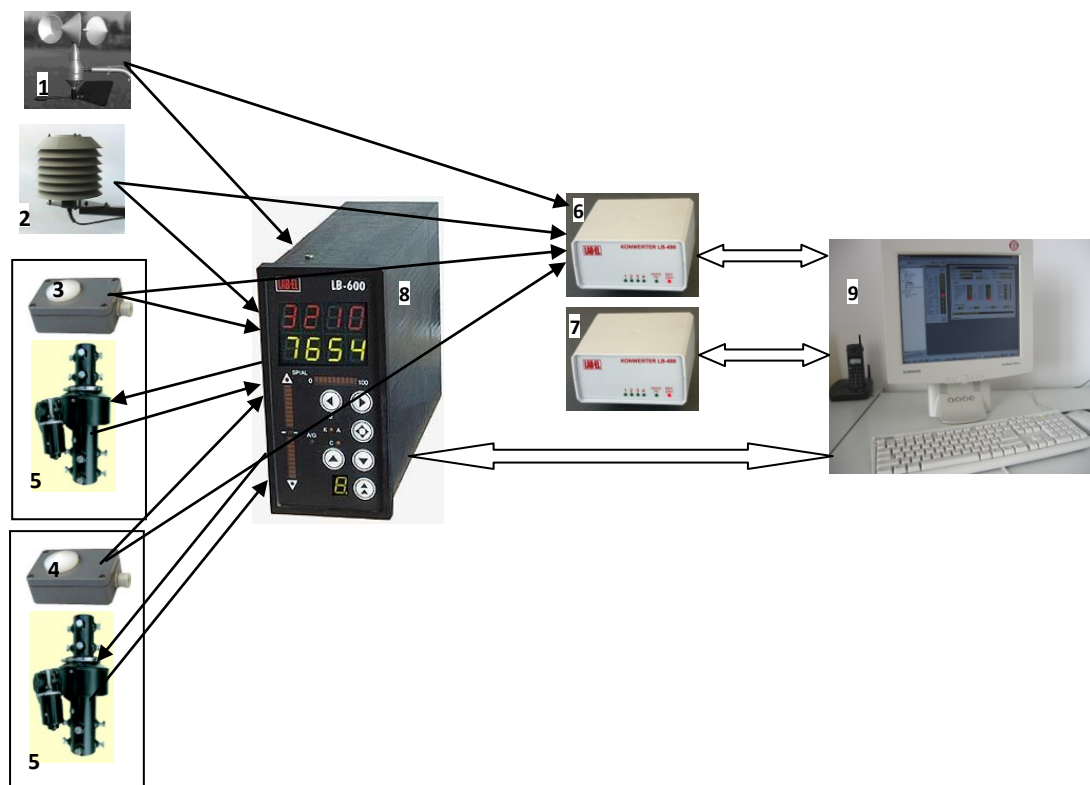
Rys. 6.23 Przykładowe obiekty synoptyczne

Wiele systemów zarządzania produkcją czy jakością wymaga bezwzględnej ochrony danych bieżących i archiwizowanych, dlatego w programie LBX dostęp do domeny (serwera LBX) podlega autoryzacji przez każdego klienta z osobna. Wymagane jest konto, a do autoryzacji używane są nazwy użytkowników oraz hasła. Z każdym użytkownikiem związane są uprawnienia, którymi on dysponuje, pozwalające ograniczyć możliwe jego działania (typowe uprawnienia to: podgląd danych, zmiana ustawień, zmiana konfiguracji, administrator). Każdy zdalny dostęp do serwera jest rejestrowany, jest również możliwość podglądu kto w danej chwili jest połączony z serwerem.

7. Przykładowe aplikacje nieprzemysłowe zrealizowane przez autora z wykorzystaniem regulatora LB-600

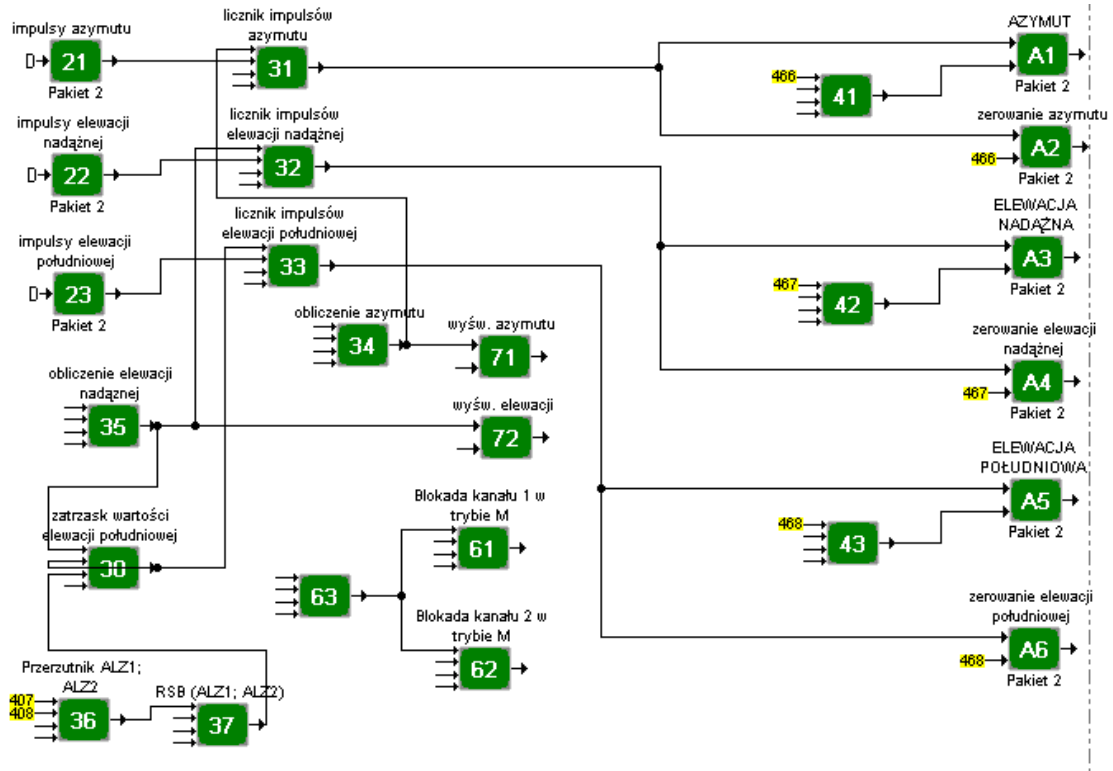
7.1 Stacja pyranometryczna na terenie WIP SGGW

Od paru lat, na terenie WIP SGGW pracuje stacja meteorologiczna, która oprócz klasycznych elementów stacji takich jak wiatromierz, termohigrometr, posiada trzy pyranometry czyli przyrządy służące do pomiaru natężenia promieniowania słonecznego. Jeden z nich pracuje w statycznej pozycji poziomej mierząc ogólne światło rozproszone, dwa pozostałe zabudowane są na obrotnicach przystosowanych do poruszania anten satelitarnych. Jeden z piranometrów porusza się tylko w płaszczyźnie wertykalnej, mierząc promieniowanie. Drugi natomiast porusza się w dwóch płaszczyznach: horyzontalnej – nadążanie za położeniem słońca (obliczanie tzw. azymutu) oraz wertykalnej – obliczanie tzw. elewacji. Obrotnice sterowane są przez regulator LB-600. W celu wykasowania ewentualnych błędów położenia, o godzinie 2:00 w nocy, obie obrotnice powracają do położenia wyjściowego (startowego), aby wraz ze wschodem słońca, ruszyć do pracy. Całość nadzorują algorytmy astronomiczne przedstawione w rozdz. 5.13, a czas będący najważniejszym elementem systemu jest mierzony przez zegar regulatora, synchronizowany z zegarem komputera-serwera. Dane ze stacji meteorologicznej zbierane są na dysk serwera za pośrednictwem konwerterów LB-486, a dane położenia aktualnego pyranometrów bezpośrednio z regulatora LB-600. Bazę danych nadzoruje i zarządza jej archiwizacją program LBX.



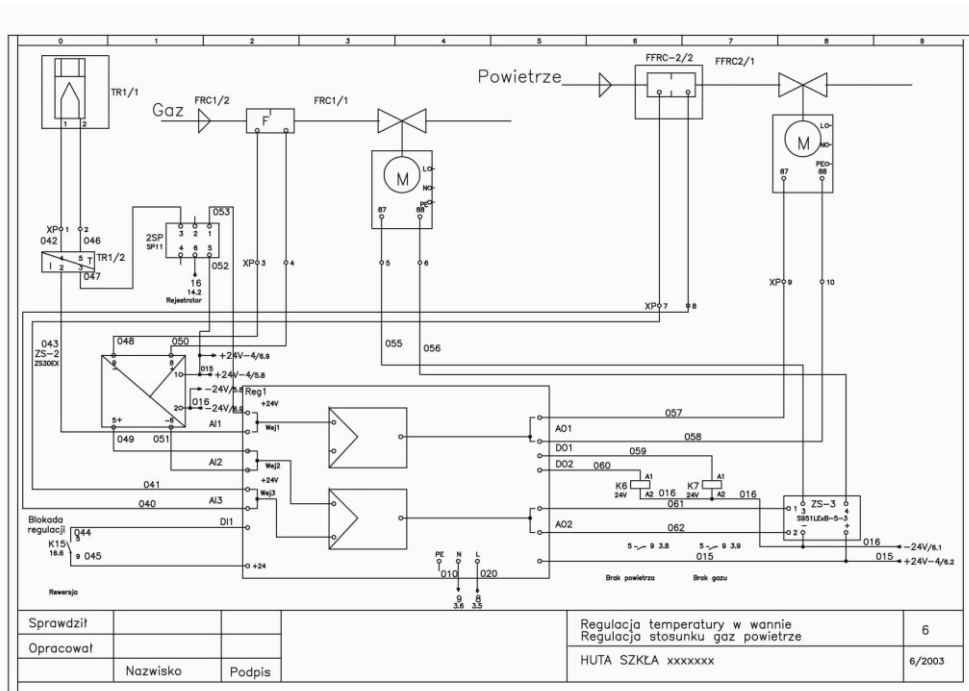
Rys. 7.1 Schemat blokowy stacji pyranometrycznej

Na rys. 7.1 przedstawiono schemat blokowy stacji pyranometrycznej, a strukturę sterowania obrotnicami zapisaną w regulatorze LB-600, na rys. 7.2.



Rys. 7.2 Struktura funkcjonalna realizująca sterowanie obrotnicami

7.2 Aplikacja regulacji stosunku „gaz/powietrze”



Rys. 7.3 Schemat regulacji stosunku gaz/powietrze

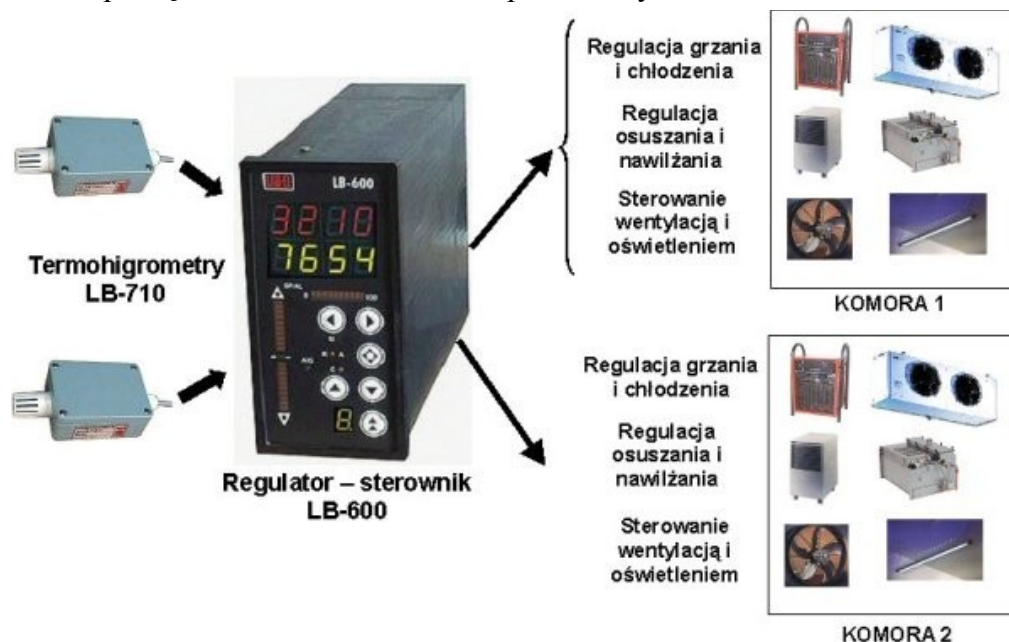
Regulacja stosunku dwóch wielkości to dość typowy przypadek regulacji optymalizującej koszty energii. Ogrzewanie olbrzymich wani szklarskich wymaga zużycia dużych ilości gazu. W hucie szkła, gdzie zrealizowano regulację stosunku przedstawioną na rys. 7.3, oszczędności z tytułu dobrego prowadzenia procesu przez regulator LB-600, wyniosły 15 – 20%.

7.3 Stacja hodowli roślin w Instytucie Hodowli Roślin i Nasiennictwa w Poznaniu

Podstawowym zadaniem całego systemu jest utrzymywanie w sztucznych komorach hodowlanych parametrów optymalnych do hodowli wybranych roślin. Obejmowane parametry sterowane to: wilgotność, temperatura i oświetlenie. Fizyczna, sprzętowa konfiguracja regulatora LB-600 jest następująca:

- 2 pakiety wejść/wyjść binarnych, przekaźnikowych,
- pakiet transmisji szeregowej z interfejsem RS-485 i S300.

Pomiary temperatury i wilgotności w dwóch komorach realizowane są przez termohigrometry LB-710 podłączone do dwóch kanałów pomiarowych S300.



Rys. 7.4 Schemat blokowy systemu regulacji mikroklimatu w komorach

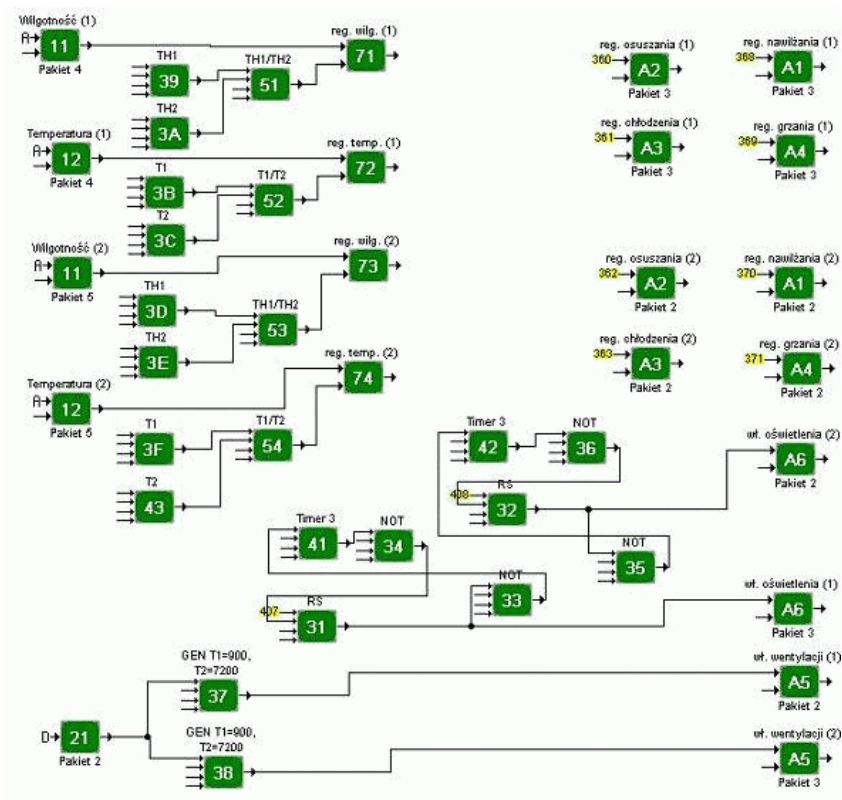
Struktura funkcjonalna realizująca sterowanie przedstawiona jest na rys. 7.5. Regulacja wilgotności realizowana jest przez funkcyj 71 w komorze 1 oraz przez funkcyj 73 w komorze 2 poprzez wyjścia binarne-przekaźnikowe załączające nawilżacz oraz osuszacz, odpowiednio z wyjścia A1 i A2 na pakiecie 3, w komorze 1 oraz A1 i A2 na pakiecie 2, w komorze 2. W układzie wykorzystano regulację trójstawną 3P (dla układów grzania i chłodzenia). Specyficzną cechą regulacji jest wykorzystanie funkcyj 39, 3A i 51 oraz 3D, 3E i 53 jako wybieraków wartości zadanej przełączanej stanem logicznym funkcyj 31 i 32. Przełączanie wartości zadanych jest zsynchronizowane z uruchamianiem timerów włączających oświetlenie.

Regulacja temperatury realizowana jest przez funkktor 72 w komorze 1 oraz przez funkktor 74 w komorze 2 poprzez wyjścia binarne-przełącznikowe załączające nagrzewnicę oraz chłodnicę, odpowiednio z wyjścia A4 i A3 na pakiecie 3, w komorze 1 oraz A4 i A3 na pakiecie 2, w komorze 2. W układzie wykorzystano regulację trójstawną 3P (dla układów grzania i chłodzenia). Specyficzną cechą regulacji jest wykorzystanie funkktorów 3B, 3C i 52 oraz 3F, 43 i 54 jako wybieraków wartości zadanej przełączanej stanem logicznym funkktorów odpowiednio 31 i 32. Przełączanie wartości zadanych jest zsynchronizowane z uruchamianiem timerów włączających oświetlenie.

Timery włączające oświetlenie i przełączające wartości zadane wilgotności i temperatury uruchamiane są sygnałem z Rejestru Stanów Binarnych (RSB). Oświetlenie w komorze 1 włączane jest z opóźnieniem ustawianym w bloku 41 w stosunku do czasu startu (RSB = 407, jest to alarm zegarowy 1). Oświetlenie w komorze 2 włączane jest z opóźnieniem ustawianym w bloku 42 w stosunku do czasu startu (RSB = 408, jest to alarm zegarowy 2).

W systemie pracują jeszcze wentylatory po jednym dla każdej z komór, które załączane są poprzez wyjścia przełącznikowe A5 z pakietu 2 dla komory 1 oraz A5 z pakietu 3 dla komory 2. Wentylatory załączane są z generatorów 37 i 38, w których zaprogramowano czas pracy wentylatorów $T1 = 900s = 15$ minut oraz czas przerwy $T2 = 7200s = 2$ godziny.

W stacji hodowli roślin obsługiwane są cztery komory, z dwóch identycznych układów sterowania. Oba regulatory (obsługujące wszystkie komory) połączone są poprzez konwerter RS232/RS485 do komputera, gdzie program LBX rejestruje dane oraz umożliwia zmianę wartości parametrów procesu sterowania.

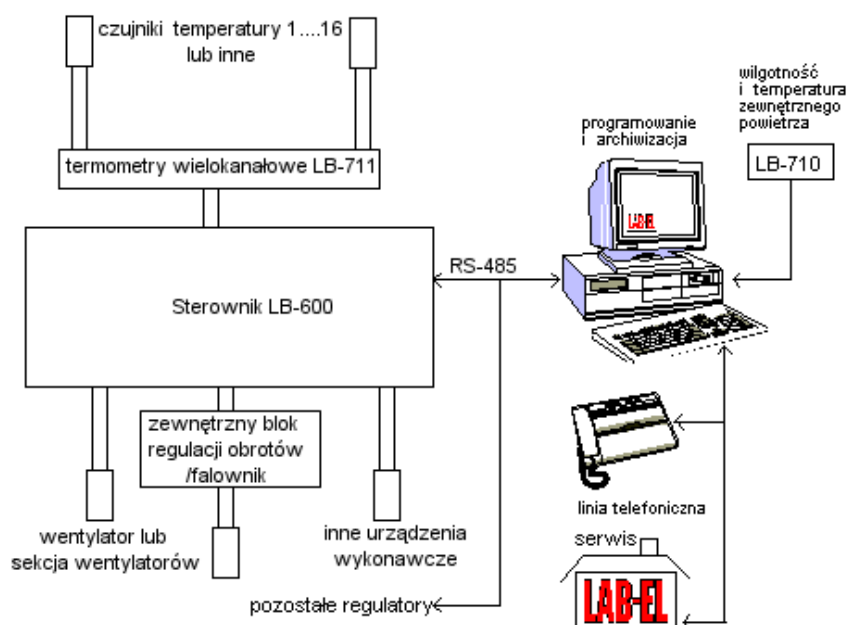


Rys. 7.5 Struktura funkcjonalna sterowania pracą komór uprawowych

7.4 Zakład hodowli zwierząt

System sterowania wentylacją służy do utrzymywania temperatury w budynkach inwentarskich lub innych pomieszczeniach, w których następuje wzrost temperatury na skutek prowadzonych tam procesów. Sterownik umożliwia także okresowe przewietrzanie pomieszczenia niezależnie od poziomu temperatury lub w zależności od poziomu CO₂. Regulator może także współpracować z dowolnymi urządzeniami wykonawczymi takimi jak: wentylatory, siłowniki elektryczne klap, przepustnic i żaluzji, urządzeniami chłodniczymi itp., sterowanymi elektrycznie w systemie sterowania analogowego jak i zał./wył. Rozbudowane funkcje sterownika pozwalają na wiele innych zastosowań w pomieszczeniach gospodarskich i poza nimi. Urządzenie sterujące jest przeznaczone do zamontowania poza pomieszczeniem produkcyjnym lub bezpośrednio w nim z wykorzystaniem skrzynek ochronnych.

System działa w oparciu o regulator-sterownik LB-600. Jest to urządzenie działające autonomicznie, ale posiada możliwość komunikacji z systemem komputerowym. Współpraca ta umożliwia zdalną zmianę nastaw parametrów sterowania a także, co jest istotne przy produkcji spożywczej i zwierzęcej, umożliwia rejestrację parametrów w obsługiwanym pomieszczeniu. Możliwości konfiguracji programowej są bardzo szerokie i umożliwiają stworzenie wielu funkcji dopasowujących do indywidualnych potrzeb. Standardowe konfiguracje umożliwiają wybór kilku wariantów sterowania. Zrealizowany układ nie wyczerpuje możliwości regulatora LB-600 i może być rozbudowywany w miarę zwiększania potrzeb użytkownika.



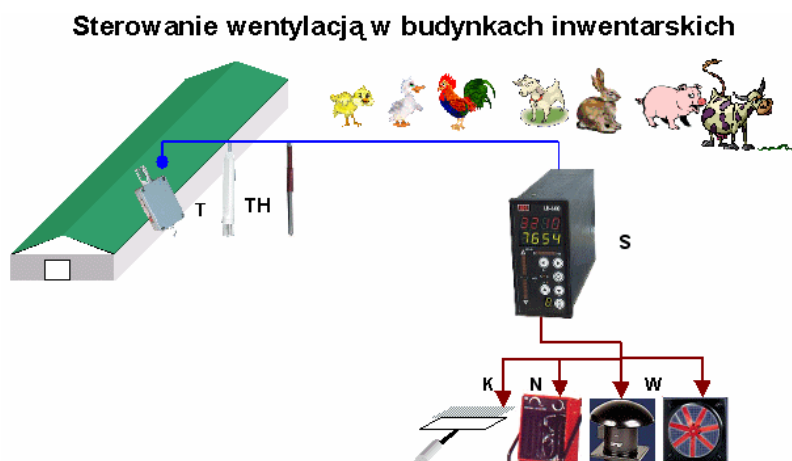
Rys. 7.6 Urządzenia współpracujące z regulatorem LB-600:

A, - sondy do pomiaru temperatury pomieszczenia lub inne sondy pomiarowe,
B - urządzenia wykonawcze (w szczególności wentylatory lub sekcje wentylatorów),
C - komputer obsługujący inne regulatory i pomiary (np. pomiar wilgotności) i umożliwiający zmianę parametrów sterowania, rejestrację danych lub generowanie sygnałów alarmowych.

Do regulatorów LB-600 mogą być dołączone przykładowo następujące elementy wykonawcze:

- przepustnice do wentylacji hali - powietrze cyrkulacyjne i świeże, jednym albo dwoma sprzężonymi elektrycznie siłownikami.
- wentylatory lub sekcje wentylatorów.
- zawór grzania, regulujący dopływ wody gorącej do nagrzewnicy w sposób włącz/wyłącz lub płynnie.
- zawór chłodzenia, regulujący dopływ wody lodowej do chłodnicy w sposób włącz/wyłącz lub płynnie.
- zawór nawilżania, regulujący dopływ rozpylonej wody (albo pary) w sposób włącz/wyłącz lub płynnie.
- regulator tyrystorowy (triakowy), służący do płynnej zmiany obrotów silnika napędzającego wentylator realizujący wentylację hali.

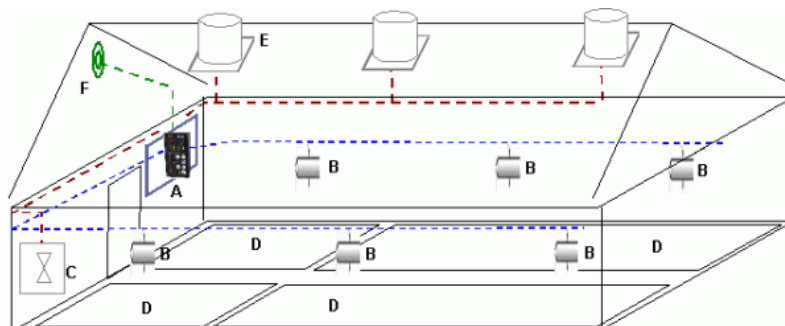
Wyjściowe sygnały regulacyjne są wynikami obliczeń dokonanych w procedurach regulacyjnych PID na podstawie wartości zadanych i aktualnych wartości mierzonych: temperatur, wilgotności i innych. Inne warianty sterowania generują sygnały w wyniku dokonania obliczeń logicznych lub zależności czasowych.



Rys. 7.7 Schemat poglądowy instalacji systemu sterowania wentylacją:
T, TH - zewnętrzne i wewnętrzne sondy pomiarowe (temperatury, wilgotności, ciśnienia i inne) w wykonaniu obudów przemysłowym lub rurkowym o dużej odporności na wilgoć i korozję, S - sterownik wentylacji LB-600, K, N, W - urządzenia wykonawcze zależne od potrzeb (wentylatory, przepustnice, nagrzewnice itp.)

Sterownik zastosowano dla 4 pomieszczeń/boksów. W każdym z pomieszczeń mierzonych może być do 8 temperatur (sterowania może odbywać się w funkcji średniej lub wybranej temperatury) i można sterować dwoma sekcjami wentylacji – jedną w sposób włącz / wyłącz, a drugą z regulacją obrotów. Dodatkowo mogą być zrealizowane funkcje takie jak np.: sygnalizacja otwarcia drzwi czy też braku wody w zbiornikach lub załączeniem czasowym podajnika czy też światła. Możliwości konfiguracyjne pozwalają np.: nastawić temperaturę utrzymy-

wana, alarm temperatury minimalnej, alarm temperatury maksymalnej, czas przewietrzania, okres przewietrzania, zakres regulacji, obroty minimalne, obroty maksymalne, temperaturę włączenia grzania, temperaturę wyłączenia grzania, nastawić korekcję temperatury, hasło i wiele innych zależnych od potrzeb.



Rys. 7.8 Schemat poglądowy przykładowej aplikacji systemami sterowania wentylacją:
A- sterownik LB-600 wraz z elementami zasilającymi i pośredniczącymi w sterowaniu i skrzynką ochronną, B- czujniki temperatury, wilgotności, oświetlenia, ciśnienia itp. (max do 32 czujników), E, C - elementy wykonawcze (wentylatory, sekcje wentylatorów, inne urządzenia wykonawcze) do 4 sterowanych w sposób ciągły i 6 w sposób włącz-wyłącz, D- pomieszczenia, boksy lub części pomieszczeń o różnych parametrach, F- sygnalizator akustyczny.

Konstrukcja urządzenia oraz działanie oprogramowania sterującego zostało opracowane przy konsultacji z wieloma ekspertami oraz hodowcami drobiu, trzody i bydła. Sterownik może mieć także zastosowanie do hodowli zwierząt futerkowych i innych.

Dzięki nowoczesnej konstrukcji regulatorów istnieje możliwość wielokrotnego, samodzielnego wpisania dowolnych struktur sterowania. Regulatory LB-600 mogą pracować we wspólnej instalacji z innymi regulatorami i rejestratorami.

7.5 Koncepcja automatyzacji szklarni na Wydziale Ogrodniczym SGGW

Procesy zachodzące w szklarniach przeznaczonych do upraw roślin konsumpcyjnych czy też ozdobnych są nie tylko złożone ale i dość liczne. Szklarnia jest obiektem wrażliwym na wszelkie zakłócenia zewnętrzne, jest obiektem wrażliwym i trudnym do sterowania. Szczególnie w okresach zimowych, kiedy zaczynają działać układy grzewcze, istotnym czynnikiem stają się koszty. Optymalne sterowanie procesami szklarniowymi to wyzwanie dla regulatora LB-600, a szczególnie dla jego elastyczności i uniwersalności w sensie możliwości tworzenia różnych konfiguracji sprzętowych i programowych. Wyposażenie regulatora w obsługę interfejsu S-300 umożliwia stosowanie sond produkcji firmy LAB-EL, do pomiarów temperatury i wilgotności, prędkości i kierunku wiatru oraz innych przyrządów i czujników. Poniżej przedstawione będą procesy występujące w szklarniach. Pojedynczy regulator LB-600 może obsłużyć niektóre tylko z nich z uwagi na ograniczoną liczbę wejść i wyjść. Pod koniec rozdziału przedstawiona zostanie tablica przedstawiająca w sensie ilościowym sygnały niezbędne i tro-

chę „nadmiarowych” do sterowania procesami w szklarniach. Szklarnia, jako zbiór procesów sterowania może stanowić pewien wzorzec dla innych zastosowań w rolnictwie. Można pokusić się o stwierdzenie że procesy występujące w pieczarkarniach, stacjach hodowli drobiu czy zwierząt pod względem skali trudności sterowania stanowią podzbiory procesów szklarniowych.

Procesy w szklarniach:

1. Wietrzenie

Wietrzenie ma za zadanie:

- ◆ obniżenie temperatury w szklarni, obniżanie rozpoczyna się powyżej zadanej temperatury powietrza T1 i kończy się poniżej zadanej temperatury T2 ($T2 > T1$). Pozostaje zwykle pewna strefa nieczułości (typowo około $1..2^{\circ}\text{C}$);
- ◆ doprowadzenia z zewnątrz CO_2 zużywanego w szklarni przez rośliny. Minimalne stężenie to 100...150 ppm, typową normą jest poziom około 330 ppm. Czasami poziom CO_2 jest regulowany poprzez dopuszczenie CO_2 z innego źródła: dla roślin spożywczych, np. pomidorów – ze zbiornika (CO_2 jest wtedy przywożone do szklarni cysterami), a dla roślin ozdobnych, np. róże – ze spalin z pieca, np. gazowego.

Do wietrzenia stosuje się wywietrzniki:

- ◆ górne (na kalenicy), otwierane w pierwszej kolejności, najpierw od strony zawietrznej, potem od strony nawietrznej;
- ◆ boczne, otwierane dodatkowo jeśli wywietrzniki górne są niewystarczające.

Wielkość kąta otwarcia wywietrzników jest ograniczana przez użytkownika do zadanej wartości, a prędkość wiatru stanowi istotne zakłócenie procesu. Wywietrzniki są zamykane przy zbyt silnym wietrze, w szczególności pierwsze są zamykane wywietrzniki nawietrzne. Zalecane jest stosowanie podwójnego zestawu wyłączników krańcowych ze względu na możliwość poważnego uszkodzenia szklarni przez niewyłączony w porę napęd wywietrzników.

Zwykle silniki wywietrzników są trójfazowe, a więc do ich sterowania stosowane są dodatkowe zewnętrzne styczniki z zabezpieczeniami termicznymi nad prądowymi.

Sterowanie wywietrznikami odbywa się poprzez podanie przez określony czas sygnału „otwieraj” lub „zamykaj”, co daje zmianę otwarcia o określony kąt. Niezbędne jest więc zaprogramowanie czasu na ruch siłowników od pozycji „zamknięte = 0%” do pozycji „otwarte = 100%”.

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 4 x 2 wyjścia przekaźnikowe (zestyki zwierne) 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników, ale z gasikami RC, do siłowników;
- ◆ 4 x 2 wejścia wyłączników krańcowych siłowników wywietrzników (transoptory z rezystorami do podłączenia na napięcie 24V lub 230V/50Hz - konfigurowalne);
- ◆ 2 wyjścia przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników, ale z gasikami RC, do zaworu dopuszczenia CO_2 ,
- ◆ 2 wejścia wyłączników krańcowych zaworu dopuszczania CO_2 (transoptory z rezystorami do podłączenia na napięcie 24V lub 220V/50Hz - konfigurowalne),

- ◆ 1 wejście S-300 do wiatromierza – na cały system regulatorów (jeden wiatromierz dla całego systemu).

2. Pomiar temperatury powietrza

Temperatura powietrza powinna być mierzona typowo w trzech punktach rozmieszczonych np. na początku, końcu i w środku szklarni. Zakres zadanej temperatury powietrza zawiera się typowo w przedziale 5...30°C. Do pomiaru można wykorzystać sondy typu Pt1000.

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 3 wejścia termometru Pt1000;
- ◆ lub jedno wejście S-300 i ośmiokanałowy termometr LB-711 (taki układ jest zrealizowany w szklarni Wydziału Ogrodniczego SGGW).

3. Pomiar temperatury wody w grzejnikach

Zwykle stosuje się systemy grzewcze z zaworem trójdrożnym i pompą obiegową, ponieważ tylko wtedy, można uzyskać równomierny rozkład temperatury w całej długiej rurze grzejącej. Zwykle też występują dwa niezależne obiegi grzejące, rozdzielane zaworami ręcznymi albo sterowanymi:

- ◆ obieg dolny, pod półkami z roślinami (tzw. parapetami), służący do dogrzewania podłoża w doniczkach;
- ◆ obieg górny nad roślinami, służący do dogrzewania samego powietrza (w zależności od fazy wzrostu roślin czasami potrzebne jest cieplejsze powietrze od podłoża lub odwrotnie).

Pomiar temperatury wody jest ważny ze względu na konieczność kontroli przeciw - zamrznawczej. Pomiar będzie dla obu obwodów na wejściu i wyjściu rury grzejącej (grzejnika).

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 4 wejścia termometrów Pt1000;
- ◆ lub wykorzystanie rezerwowych czujników z LB-711- patrz pkt. 2

4. Pomiar temperatury podłoża w doniczkach

Typowy zakres pomiaru: 5...30°C.

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 8 czujników temperatury podłączonych do LB-711 i rozwieszonych w szklarni.

5. Sterowanie ogrzewaniem szklarni

Ważne jest przy sterowaniu ogrzewaniem zwrócenie uwagi na następujące zagadnienia:

- ◆ uruchamianie ogrzewania nie może nigdy być uderzeniowe (tzn. szybkie pełne otwarcie zaworu). Ze względu na ograniczoną wydajność pieca, musi być włączane stopniowo, np. z ograniczeniem otwarcia zaworu do maksymalnego przyrostu otwarcia w określonym czasie. Do pieca nie należy dostarczać zbyt dużej ilości zimnej wody, gdyż piec ma swoje optymalne warunki pracy: wydajność oraz temperaturę wody na wejściu i wyjściu. Przydatne byłoby więc informowanie regulatorów w szklarni np. o aktualnej temperaturze wody na wyjściu z pieca i w zależności od jej spadku – ograniczanie otwarcia zaworów;
- ◆ istnieje bardzo duża bezwładność systemu grzewczego;

- ◆ konieczne jest uwzględnienie typowego przebiegu dobowego temperatur zewnętrznych (np. nie ma co grzać tuż przed wschodem słońca, gdyż zaraz będzie grzać słońce) – predykcja dobową, pogodową.
- ◆ konieczne jest realizowanie odpowiedniego przebiegu dobowego temperatury powietrza w szklarni: przykładowo temperatura powinna wynosić od godziny 18-tej do 5-tej – 16°C, od 5-tej do 7-mej – 12°C, a do 7-mej do 18-tej – 20°C. Godziny i wartości powinny być ustawiane przez użytkownika.

Typowo przyjmuje się, że błąd (strefa nieczułości) regulacji temperatury powietrza może wynosić dla podłoża 1°C, dla powietrza 1...2°C.

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 2 x 2 wyjścia przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników, ale z gasikami RC;
- ◆ 2 x 2 wejścia wyłączników krańcowych (transoptory z rezystorami do podłączenia na napięcie 24V lub 230V/50Hz - konfigurowane);
- ◆ 1 wejście S-300 do termometru LB-711 przy piecu (wyjście i wejście wody na piecu) – na cały system regulatorów (1 lub kilka regulatorów).

6. Sterowanie dodatkowym chłodzeniem szklarni

Oprócz opisanego w p.1 wietrzenia, do chłodzenia szklarni mogą być użyte urządzenia dodatkowe:

- ◆ wentylator wyciągowy;
- ◆ polewanie wodą dachu szklarni (od zewnątrz);
- ◆ cieniowanie (patrz p.7).

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji (bez cieniowania):

- ◆ 2 wyjścia przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników, ale z gasikami RC.

7. Cieniowanie

Cieniowanie polega na zaciąganiu kurtyn pomiędzy roślinami, a dachem szklarni. W ambitnych systemach stosuje się 2 typy cieniowania:

- ◆ mające za zadanie izolację cieplną i/lub pełne zaciemnienie;
- ◆ ograniczenie intensywności słońca (przyciemnianie, chłodzenie).

Zwykle jest jednak jedno cieniowanie, np. o regulowanym stopniu zasunięcia.

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 2 x 2 wyjścia przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników, ale z gasikami RC,
- ◆ 2 x 2 wejścia wyłączników krańcowych (transoptory z rezystorami do podłączenia na napięcie 24V lub 230V/50Hz - konfigurowane),

8. Doświetlanie

Stosuje się doświetlanie:

- ◆ wegetacyjne: natężenie światła latem wynosi do 90.000 lx. W okresie zimowych często występuje konieczność doświetlenia o wartości 4000...8000 lx;

- ◆ indukcyjne, o wartości 30...100 lx, włączane zwykle raz na godzinę na kilka minut.

Doświetlanie stosuje się w zależności od wymagań danej uprawy oraz oświetlenia zewnętrznego, wymagany jest więc jego pomiar. Celowe jest też mierzenie (sumowanie luksów) dawki promieniowania wewnętrznego, jaką otrzymały rośliny.

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 2 wyjścia przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników ale z gasikami RC,
- ◆ 1 wejście S-300 do wewnętrznego miernika oświetlenia (lx),
- ◆ 1 wejście S-300 do zewnętrznego miernika oświetlenia (lx) (jedno na system).

9. Zraszanie (rozpylanie wody nad roślinami)

Włączanie zraszania następuje pod wpływem:

- ◆ przekroczenia wewnątrz szklarni dawki lxs w czasie (luxosekund, sumy natężenia światła w czasie);
- ◆ sygnału z czujnika „suchego liścia” istniejącego powyżej zaprogramowanego czasu;
- ◆ upływu czasu, włączanie zraszania, co zaprogramowany czas (typowo w zakresie 15 min...4 godz) na określony czas (typowo 10 sekund...5 minut). Czas zraszania może być zaprogramowany na stałe lub może zależeć od ilości lxs lub pomiarów z czujnika „suchego liścia”. Np. przy ukorzenianiu cały czas liście roślin muszą być wilgotne.

Interfejsy regulatora do tej funkcji:

- ◆ 2 wyjścia przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników ale z gasikami RC,
- ◆ 1 wejście S-300 do wewnętrznego miernika „suchy liść”,
- ◆ pozostałe – wymienione w innych punktach.

10. Pomiar wilgotności

Prowadzony jest pomiar wilgotności:

- ◆ powietrza w szklarni (typowy poziom to 80...85%);
- ◆ podłoża roślin.

Pomiar wilgotności w podłożu może być wykonywany kilkoma metodami:

- ◆ przewodnictwa elektrycznego;
- ◆ metoda przewodnictwa cieplnego;
- ◆ tensometrycznie (pomiar podciśnienia wytwarzanego w podłożu przez niedobór wody i efekt włoskowatości gleby);
- ◆ ewaporymetrycznie (pomiar wielkości parowania wody z gleby i uzupełnianie gleby o wartość współzależną do wielkości parowania).

Do zastosowań praktycznych – są przydatne dwie pierwsze metody.

Interfejsy regulatora do tej funkcji:

- ◆ 1 wejście S-300 do wewnętrznego miernika wilgotności i temperatury powietrza (LB-710),
- ◆ 1..2 wejścia S-300 do wewnętrznego miernika wilgotności podłoża.

11. Podlewanie

Podlewanie w szklarni jest prowadzone w zależności od wilgotności gleby. Podlewanie powinno być prowadzone:

- ◆ rano lub wieczorem (o określonych godzinach);
- ◆ nie w intensywnym słońcu;
- ◆ odpowiednio wcześniej przed zachodem słońca (osuszanie przed nocą);
- ◆ w sposób uzależniony od godziny i dnia tygodnia.

Interfejsy regulatora do tej funkcji:

- ◆ 2 wyjścia przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników ale z gasikami RC;
- ◆ pozostałe – wymienione w innych punktach.

12. Nawożenie

Obecnie stosuje się często uprawę na podłożach niebędących glebą (np. na włóknach kokosu). Uprawa taka wymaga ciągłego dostarczania pożywki o określonym składzie chemicznym, przepływającej przez podłoże. Wytwarzanie pożywki polega na okresowym uruchamianiu zaworków dopuszczających stężone substancje chemiczne do wody krążącej w obwodzie nawożenia. Woda z dozowanymi substancjami przepływająca przez podłoże i wraca na początek układu celem uzupełnienia pobranych substancji chemicznych. Celowe jest też okresowe odwracanie kierunku przepływu pożywki w podłożu, gdyż inaczej zawsze na początku jest większe stężenie pożywki, a na końcu mniejsze.

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 4 wyjścia przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników, ale z gasikami RC, do sterowania dopływem substancji chemicznych ze zbiorników,
- ◆ 1..2 wyjście przekaźnikowe zwierne 230V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników, ale z gasikami RC, do sterowania kierunkiem przepływu.
- ◆ 4 wejścia S-300 do: czujników: pH, EC, temperatury, ..(?)
- ◆ pozostałe – wymienione w innych punktach.

13. Inne funkcje

Inne funkcje to:

- ◆ włączanie ruchu powietrza wewnątrz szklarni wentylatorem;

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 1 wyjście przekaźnikowe zwierne 220V/16A, izolowane, mogą być bez bezpieczników ale z gasikami RC.

14. Pomiary wspólne dla całego systemu

W systemie (1 lub kilka regulatorów) wymagane są pomiary wspólne z zewnętrzną stacją meteo i z pieca, niektóre z nich wymienione zostały już wcześniej:

- ◆ 1 wejście S-300 do wiatromierza,
- ◆ 1 wejście S-300 do zewnętrznego miernika oświetlenia (lx),
- ◆ 1 wejście S-300 do zewnętrznego termohigrometru (LB-710),

- ◆ 1 wejście S-300 do termometru LB-711 przy piecu (wyjście i wejście wody na piecu).

15. Inne pomiary i sterowania w szklarni

Możliwa jest konieczność innych pomiarów i sterowań w szklarni wykonywana specjalistycznymi miernikami:

- ◆ pomiar stężenia CO₂;
- ◆ pomiar stężenia innego gazu, itp.

Interfejsy regulatora do realizacji tej funkcji:

- ◆ 2 wejście analogowe 0...10V/4...20mA;
- ◆ 2 wejścia do sondy psychrometrycznej (pomiar wilgotności metodą dwóch termometrów „suchego” i „mokrego”;
- ◆ 4 wyjścia 0..10V (minimum) do siłowników analogowych;
- ◆ 1 wyjście 0..10V dodatkowo izolowane do sterowania falownikiem.

Poniższa tabela podsumowuje wejścia i wyjścia wymienione w powyższych założeniach:

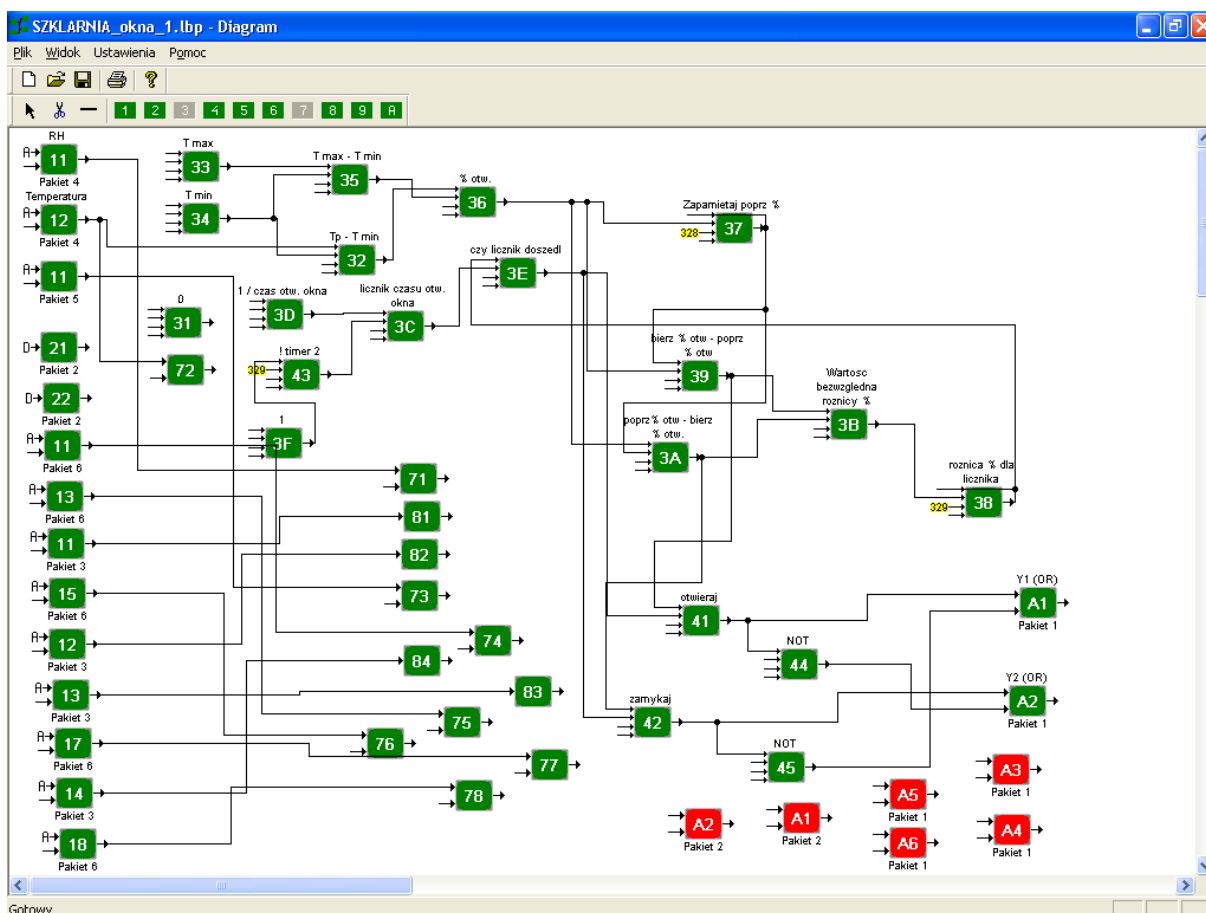
Tablica 7.1 Bilans sygnałów wejściowych i wyjściowych do sterowania szklarnią

Punkt opisu	Wyjście przekaźnikowe	Wejście binarne	Wejście Pt1000	Wejście 2xPt	Wejście S300	Wejście 0..10V/4...20mA	Wyjście 0..10V/4...20mA
1	10	10			1		
2			3				
3			4				
4			8				
5	4	4			1		
6	2						
7	4	4					
8	2				2		
9	2				1		
10					3		
11	2						
12	6				4		
13	1						
14					1		
15						5	5
Razem	33	18	15	2	13	5	5

Liczba sygnałów analogowych i binarnych potrzebnych do realizacji wymienionych wyżej zadań sterowania procesami w szklarni lub pieczarkarni jest dość duża. Realizacja na pojedynczym regulatorze LB-600 raczej się nie uda. Liczba sygnałów wyjść binarnych jest dość duża i w obecnej konfiguracji regulatora niemożliwa do pokrycia. Regulator posiada w konfiguracji podstawowej 6 wyjść przekaźnikowych, przy konfiguracji z trzema pakietami wejść/wyjść binarnych, 24 wejścia binarne i 18 wyjść przekaźnikowych. Liczba ta nie zapewnia pełnych potrzeb systemu szklarniowego. Nie wszystkie jednak elementy systemu sterowania są niezbędne, w opracowaniu podano pewien maksymalny w sensie ilościowym przy-

padek realizacji. Przy podejściu optymalnym 2 regulatory LB-600, sprzężone przez RS-485 z systemem komputerowym mogłyby z omówionym procesem sterowania świetnie sobie poradzić.

W ubiegłym roku wraz z dr Krzysztofem Korpyszem oraz dyplomantem Wydziału Inżynierii Produkcji Filipem Kamińskim, rozpoczęliśmy pracę nad automatyzacją szklarni na Wydziale Ogrodnictwa SGGW. Od strony sprzętowej wszystko jest wykonane. Pozostało przetestowanie zaproponowanej struktury sterowania opracowanej przy udziale Kierownika szklarni mgr inż. Dawida Bujalskiego oraz podłączenie sterowania oknami i zaciemnieniem. Może w tym roku uda się sfinalizować przedsięwzięcie. Struktura sterowania została przedstawiona na rys. 7.9.



Rys. 7.9 Struktura funkcjonalna sterowania szklarnia

8. Podsumowanie i wnioski

Problemy automatyki przemysłowej są zadaniami inżynierskimi, których rozwiązanie zależy od postawionego zadania, rozpoznania procesu – zarówno pod względem budowy jak miejsca i amplitudy możliwych zakłóceń, a przede wszystkim od sztuki projektowania, polegającej na łączeniu tych wszystkich elementów. Dużą pomoc w rozwiązywaniu tych problemów znajdują projektanci systemów automatyzacji zarówno w rozwijającej się technice kom-

puterowej oraz specjalistycznym oprogramowaniu, jak i w rozwoju dobrze zaprojektowanej, przyjaznej dla użytkownika aparatury pomiarowej i regulacyjnej. Postęp technologiczny sprzyja wszelkim działaniom badawczym i eksperymentatorskim, a coraz lepsze układy mikroprocesorowe charakteryzujące się dużymi pojemnościami pamięci i małymi czasami przetwarzania umożliwiają tworzenie bardzo skomplikowanych algorytmów sterowania i regulacji.

Niezbędnym i niezastąpionym jest jednak udział człowieka, a właściwie jego wiedzy i doświadczenia, nie tylko w tworzeniu nowych algorytmów, ale i ich użytkowaniu. Algorytmy realizujące regulację w pełni adaptacyjną, muszą być zaprogramowane, sparametryzowane przez człowieka znającego proces technologiczny, jego dynamikę, charakter zakłóceń, wrażliwość na stany przejściowe, itp. Zaprezentowane w pracy algorytmy samostrojzenia realizowane przez regulator LB-600, wymagają ustawienia parametrów wymagających wiedzy u użytkownika np. na ile można zakłócić proces podczas skoku identyfikacyjnego sterowania, aby nie spowodować niepożądanych skutków nieodpowiedzialnej decyzji. Tak więc, najważniejszą w każdej dziedzinie jest tzw. wiedza ekspercka. Ekspertem może być osoba w danej dziedzinie wykształcona, posiadająca doświadczenie, czy nawet rutynę.

Dobór odpowiedniego algorytmu musi być poprzedzony nawet prostą analizą polegającą na określeniu:

- co regulujemy? – np. temperatura jest wielkością wolnozmienną, ciśnienie - szybkozmienną, regulacja pH jest obciążona dużym opóźnieniem, itp.;
- jaki czujnik czy przetwornik mierzy wielkość regulowaną?
- czy regulacja ma być stałowartościowa, czy obiekt wymaga regulacji kaskadowej, z zewnętrzną wartością zadaną?
- jaka jest dynamika i charakter regulowanego procesu?
- jaki jest element wykonawczy? – np. zawór sterowany sygnałem ciągłym, czy napędzany silownikiem elektrycznym, czy typu on/off ;
- co z zakłóceniami?
- jaki algorytm będzie najbardziej odpowiedni?
- czy warto przeprowadzić procedurę samostrojzenia, czy zaufać doświadczeniu i praktyce?
- a może dla procesu nieliniowego wykorzystać algorytm PID Fuzzy Logic, bądź inną regulację tablicową?

Pytań może być wiele. Niekiedy nie mamy czasu, aby na nie odpowiadać. W większości przypadków eksperymentujemy. Jeżeli obiekt jest w ruchu nie można przerwać pętli sprzężenia zwrotnego, aby na układzie otwartym przeprowadzić identyfikację jego dynamiki.

A oto kilka wniosków:

1. wybór algorytmu regulacji musi być poprzedzony analizą regulowanego procesu;
2. od rodzaju elementów wykonawczych zależy wybór odpowiedniego rodzaju regulacji (ciągła, 2P, 3P);
3. regulacja stosunku dwóch wielkości musi być poprzedzona przeliczeniem wartości stosunku na skale obu wielkości;

4. wszystkie algorytmy pobierające wartość zadaną SP z zewnątrz (z innego regulatora, z funkcyj gdzie jest wyliczana, z tablic, itp.) muszą być realizowane po przełączeniu trybu pracy regulatora na „K” – kaskada;
5. mając dane parametry dynamiki procesu (K , τ , τ_D), dla poprawy jakości regulacji można stosować dowolne kryterium jakościowe;
6. nastawy PID regulatora obliczane przez różne procedury samostrojzenia mogą się różnić;

Niniejsza praca stanowi usystematyzowany zbiór informacji pochodzący z mojego dorobku:

- wykształcenie inżynierskie PW Wydział Elektryczny specjalność Automatyka i Metrologia Elektryczna oraz PW Wydział Elektroniki specjalność Komputerowa Technika Pomiarowa;
- artykuły do prasy technicznej (PAK, POMIAR, itp.);
- współautorstwo dwóch książek w tym [WK1];
- wygłaszane w kraju i zagranicą referaty nt. techniki regulacji;
- własne doświadczenia z wieloletniej pracy w zakładach produkujących aparaturę kontrolno-pomiarową, konstrukcja urządzeń elektronicznych w tym rodziny regulatorów Efronik X, a potem LB-600, doświadczenia obiektowe z kraju i zagranicy;
- dziesięcioletnia praca dydaktyczna w Zespole Szkół Zawodowych, gdzie nauczałem: podstaw elektrotechniki, elektroniki i automatyki.;
- udział konsultacyjny w pięciu pracach dyplomowych wykonywanych w Instytucie Automatyki i Robotyki PW oraz Instytucie Automatyki i Informatyki Stosowanej PW w latach 2004 – 2007;
- wieloletnia współpraca z WIP SGGW.

Bibliografia

Wydawnictwa książkowe [WKx]:

1. Z. Komor, A. Łobzowski, W. Szkolnikowski - Technika regulacji Regulator LB-600 Automatykacja procesów przemysłowych, rolniczych i klimatycznych - Agenda Wydawnicza PAK Warszawa 2003
2. Z. Kabza, K. Kostyrko, S. Zator, A. Łobzowski, W. Szkolnikowski - Regulacja mikroklimatu pomieszczenia - Agenda Wydawnicza PAK Warszawa 2005
3. J. Brzózka - Regulatory i układy automatyki - Wydawnictwo MICOM Warszawa 2004
4. J. Mazurek, H. Vogt, W. Żydanowicz – Podstawy automatyki – Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa 2002
5. W. Kwiatkowski – Wprowadzenie do automatyki – Bel Studio Warszawa 2005
6. A. Chochowski, H. Cieślak, P. Laskowski, T. Mirski – Laboratorium automatyki – Wydawnictwo SGGW Warszawa 1999
7. G.F. Franklin, J.D. Powell, M. Workman – Digital Control of Dynamic systems – Addison Wesley Longman, Inc. 1997
8. Drinkov D., Hellendorn H., Reifrank M.: Wprowadzenie do sterowania rozmytego. WNT, Warszawa 1996.
9. Hagglund T., Astrom K.J.: *Industrial adaptive controllers based on frequency response techniques*. Automatica, 1991, t.27.
10. Koj J., Żelazny M.: *Badania porównawcze procedur samostrojzenia regulatorów mikroprocesorowych*. PAK 1996 nr12.
11. Pułaczewski J.: *Cyfrowe algorytmy regulacji*. Prace IAiS PW, Warszawa 1999 – 2000
12. Shinskey F.G.: *Process control systems (application, design and adjustment)*. McGraw Hill, New York 1989.
13. Skoczowski S.: *Technika regulacji temperatury*. PAK, Warszawa 2000.
14. Szczepkowski P., Zajączkowski T.: *Wprowadzenie do systemu oprogramowania FIX firmy Intellution*. AB-MICRO, Warszawa 1997

15. Tatjewski P.: *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*. Akad. Ofic. Wyd. EXIT. Warszawa 2002.
16. Trybus L.: *Regulatory wielofunkcyjne*. WNT, Warszawa 1992.
17. GE Fanuc, Podręcznik użytkownika sterownika VersaMax.

Prace dyplomowe/magisterskie konsultowane przez autora [PDx]:

1. K. Ślusarczyk - Praca dyplomowa inżynierska – Opracowanie, wykonanie i zbadanie środowiska do prezentacji przemysłowego regulatora fuzzy-logic – Opiekun naukowy: dr inż. Z. Komor – IaiIS PW Warszawa 2004
2. K. Ślusarczyk – Praca magisterska – Zbadanie możliwości implementacji algorytmu predykcyjnego w przemysłowym regulatorze LB-600 – Promotor: dr inż. Z. Komor – IaiIS PW Warszawa 2006
3. E. Bąba – Praca dyplomowa magisterska – Projekt systemu wizualizacji do stanowiska laboratoryjnego z Podstaw Automatyki – Promotor: dr inż. D. Holejko IAiR PW Warszawa 2005

Opracowania autora [OAx]:

1. Instrukcja eksploatacyjna regulatora-sterownika LB-600 – Wyd. LAB-EL marzec 2008 wersja oprogramowania 2.21.15
2. Instrukcja oprogramowania Regulator LB-600 Wyd. LAB-EL grudzień 2004
3. Metody identyfikacji, algorytmy PID, autotuning, PID fuzzy, regulacja programowa – Wyd. LAB-EL grudzień 2004

Artukuly z prasy technicznej [APx]:

1. Kościelny J.M., Łuczyński W., Sikora A., Sochan B., Szkolnikowski W.: Zastosowanie aparatury MERA-PNEFAL S.A. typu EFTRONIK wraz z systemem monitorowania OSA-2 do sterowania procesami technologicznymi. PAK 1997 nr 4.

2. Kościelny J.M., Łuczyński W., Sikora A., Sochan B., Szkolnikowski W.: Zastosowanie aparatury MERA-PNEFAL S.A. ... , część II - Funkcje warstwy sterowania procesem. PAK 1997 nr 5.
3. Kościelny J.M., Łuczyński W., Sikora A., Sochan B., Szkolnikowski W.: Zastosowanie aparatury MERA-PNEFAL S.A. ..., część III - Funkcje warstw obsługi operatorskiej i nadzoru. PAK 1997 nr 6.
4. Koj J., Żelazny M.: Badania porównawcze procedur samostrojzenia regulatorów mikroprocesorowych. PAK 1966 nr 12.
5. Komor Z., Pułaczewski J.: Badania algorytmu "fuzzy logic" regulatora mikroprocesorowego EFTRONIK XF. Raport IAiS PW nr 97-12.
6. Oprogramowanie narzędziowe i użytkowe przyrządów firmy LAB-EL cz.4 - Wyd. Wagtech – POMIAR 4/2005

Polskie normy [PNx]

1. PN-IEC 584-1
2. PN-EN 60751+A2

Wyrażam zgodę na udostępnienie mojej pracy w czytelniach Biblioteki SGGW

.....
(czytelny podpis autora)