

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	11
1.1 ZAKRES OPRACOWANIA	11
1.2 CHARAKTERYSTYKA PROJEKTOWANIA URA	12
1.3 KOMPUTEROWE NARZĘDZIA PROJEKTOWANIA	13
1.4 MODELOWANIE CZŁONÓW URA	13
1.5 WYBÓR WYMUSZEŃ	18
1.6 CHARAKTERYSTYKA PRZEMYSŁOWYCH URA	19
1.7 STRUKTURA PROCESU PROJEKTOWANIA URA	20
1.7.1 Uwagi wstępne dotyczące metodyki projektowania URA	20
1.7.2 Główne etapy procesu projektowania URA	21
2. OBIEKT STEROWANIA I CEL REGULACJI	24
2.1 OBIEKT (PROCES) REGULACJI	24
2.2 CELE STEROWANIA I KLASYFIKACJA URA	24
2.3 DEFINIOWANIE ZADANIA STEROWANIA	25
2.3.1 Wstęp	25
2.3.2 Wybór wielkości sterujących $u(t)$	26
2.3.3 Identyfikacja zakłóceń	26
2.4 OKREŚLANIE WYMAGAŃ	27
2.4.1 Wymagania statyczne	27
2.4.2 Wymagania dynamiczne	28
2.4.3 Inne wymagania	29
2.4.4 Wymagania eksploatacyjne	29
2.4.5 Określenie kryterium optymalizacji projektowanego układu dla syntezy parametrycznej	30
2.5 ANALIZA REGULOWANEGO PROCESU (OBIEKTU STEROWANIA)	31
2.5.1 Utworzenie modelu fizycznego i matematycznego	31
2.5.2 Utworzenie modelu komputerowego	31
2.6 WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYKI STATYCZNEJ PROCESU	32
2.6.1 Edycja schematu obiektu regulacji (regulowanego procesu) w SIMULINK'u do wyznaczenia charakterystyki statycznej	32
2.6.2 Identyfikacja własności statycznych	33
2.7 IDENTYFIKACJA WŁASNOŚCI DYNAMICZNYCH PROCESU	37
2.7.1 Linearyzacja procesu	38
3. PROJEKT WSTĘPNY UKŁADU REGULACJI	40
3.1 PROJEKT STRUKTURY UKŁADU STEROWANIA	40
3.2 REGULACJA KASKADOWA	43
3.3 UKŁAD Z KOMPENSACJĄ ZAKŁÓCEŃ (SPRZĘŻENIE „WPRZÓD”)	44
3.4 UKŁAD ZE STABILIZACJĄ ZAKŁÓCEŃ	45

3.5	WYBÓR SYSTEMU APARATUROWEGO	45
3.6	DOBÓR URZĄDZEŃ WYKONAWCZYCH.....	45
3.7	DOBÓR URZĄDZEŃ POMIAROWYCH.....	46
3.8	NASZKICOWANIE SCHEMATU FUNKCJONALNEGO I SCHEMATU BLOKOWEGO	46
4.	PROJEKTOWANIE URZĄDZENIA WYKONAWCZEGO	47
4.1	WSTĘP	47
4.2	DOBÓR URZĄDZENIA WYKONAWCZEGO	47
4.3	PROJEKTOWANIE URZĄDZENIA WYKONAWCZEGO	51
4.4	PODSUMOWANIE.....	56
5.	SYNTEZA UKŁADU ELEMENTÓW FUNKCJONALNIE NIEZBĘDNYCH	57
5.1	WSTĘP	57
5.1.1	Charakterystyka statyczna URA	60
5.1.2	Liniowość charakterystyki statycznej	60
5.1.3	Cele syntezy własności statycznych URA	62
5.1.4	Założenia projektowe	62
5.1.5	Dane do syntezy	63
5.1.6	Plan syntezy własności statycznych URA	63
5.2	DOBÓR URZĄDZENIA POMIAROWEGO	64
5.3	WPLYW WZMOCNIENIA PĘTLI OTWARTEJ K NA WŁASNOŚCI STATYCZNE I DYNAMICZNE PĘTLI ZAMKNIĘTEJ URA.....	65
5.3.1	Odchyłka wielkości regulowanej w stanach ustalonych spowodowana zmianą wartości wielkości zadanej	66
5.3.2	Czułość na zmiany parametrów konstrukcyjnych członów w torze głównym	66
5.3.3	Czułość wyjścia układu w stanach ustalonych na zmianę parametrów elementów pętli sprzężenia zwrotnego oraz czułość na szумы pomiarowe $p(\omega)$	68
5.3.4	Czułość na zakłócenia w stanach ustalonych	69
5.3.5	Wpływ wzmocnienia układu otwartego na wzmocnienie układu zamkniętego	69
5.3.6	Szybkość działania	70
5.3.7	Tłumienie zakłóceń w stanach przejściowych	72
5.3.8	Stabilność	73
5.3.9	Energia potrzebna do przestawiania	74
5.3.10	Energia potrzebna do kompensacji zakłóceń	75
5.4	KONFLIKT WYMAGAŃ I TAKTYKA USTALANIA POTRZEBNEGO WZMOCNIENIA W PĘTLI OTWARTEJ	75
5.5	WYZNACZANIE POTRZEBNEGO WZMOCNIENIA W PĘTLI OTWARTEJ ZE WZGLĘDU NA BŁĘDY STATYCZNE URA	78
5.6	SPRAWDZENIE CAŁEGO UKŁADU	81
6.	SYNTEZA KOREKTORA (REGULATORA) W URA	82
6.1	WSTĘP	82
6.1.1	Zadanie syntezy	84
6.1.2	Sformułowanie problemu	85
6.1.3	Uwagi metodologiczne	85
6.1.4	Charakterystyczne typowe przypadki	89
6.2	SPOSOBY KOREKCJI	90
6.2.1	Korekcja szeregową i korekcja w sprzężeniu zwrotnym	91
6.2.2	Korekcyjne sprzężenie zwrotne (sztywne lub elastyczne) od wielkości wyjściowej	93
6.2.3	Regulator liniowy od zmiennych stanu	95

6.2.4	Regulacja dwupołożeniowa	97
6.2.5	Regulatory nieliniowe	98
6.2.6	Regulacja w układzie kaskadowym	98
6.3	RODZAJE KOREKTORÓW LINIOWYCH	100
6.3.1	Bierny (pasywny) korektor całkujący PI (lag compensator lub phase – lag compensator)	100
6.3.2	Bierny (pasywny) korektor różniczkujący PD (lead compensator lub phase – lead compensator)	102
6.3.3	Człon całkujący [Nowakowski, 1992, s. 229]	103
6.3.4	Regulator liniowy PID	103
6.3.5	Określenie T_i i T_D rzeczywistego regulatora PID dla żądanych biegunów p_1 i p_2 i zer z_1 i z_2 korektora	108
6.3.6	Wstępny dobór nastaw regulatora PID	111
6.3.7	Przykład syntezy korektora PID za pomocą RLTool	113
6.3.8	Ogólne zasady wyboru korektora liniowego i sposobu regulacji	117
6.3.9	Zasady wyboru konstrukcji korektora	118
6.4.	METODY SYNTEZY PARAMETRYCZNEJ URA – PRZEGLĄD	119
6.5.	METODA LINII PIERWIASTKOWYCH EVANSA	120
6.6.	METODA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA	129
6.7.	METODY EKSPERYMENTALNE DOBORU NASTAW REGULATORÓW PID	132
6.7.1.	Reguły Zieglera – Nicholasa (Przypadek 1)	132
6.7.2.	Wyznaczanie nastaw na podstawie odpowiedzi skokowej układu otwartego, bez regulatora (Przypadek 2: dla układu statycznego)	133
6.7.3.	Wyznaczanie nastaw na podstawie odpowiedzi skokowej układu otwartego, bez regulatora (Przypadek 3: dla układu астатycznego)	135
6.7.4.	Metody HWILS	137
6.8.	UKŁADY Z OPÓŹNIENIEM TRANSPORTOWYM	137
6.8.1.	Modelowanie opóźnienia w MATLAB'ie	137
6.8.2.	Układy regulacji obiektów z opóźnieniami	138
6.9.	SPRAWDZENIE ZAPASU STABILNOŚCI	138
6.10	SPRAWDZENIE ZDOLNOŚCI TŁUMIENIA ZAKŁÓCEŃ	139
6.11	PLAN PROJEKTOWANIA KOREKTORA	140
6.12.	PODSUMOWANIE: OGÓLNY PLAN SYNTEZY	144
7.	REGULATORY DYSKRETNE	145
7.1	WŁAŚCIWOŚCI REGULATORÓW CYFROWYCH	145
7.2	RODZAJE REGULATORÓW DYSKRETNYCH, ALGORYTMY	146
7.2.1	Przykładowe transmitancje dyskretne teoretycznych regulatorów PID	149
7.2.2	Przykładowe transmitancje dyskretne rzeczywistych regulatorów PID	149
7.2.3	Algorytmy regulatorów dyskretnych PID, formy różnicowe	151
7.2.4	Sposoby całkowania i różniczkowania numerycznego	153
7.2.5	Błędy algorytmów regulatorów cyfrowych	154
7.3	PROJEKTOWANIE PARAMETRYCZNE REGULATORÓW DYSKRETNYCH, DOBÓR NASTAW	154
7.3.1	Zasady eksperymentalnego doboru nastaw regulatora dyskretnego PID sposobem Åströma–Hägglunda	157
7.3.2	Zasady eksperymentalnego doboru nastaw regulatora dyskretnego PID na podstawie odpowiedzi skokowych układu otwartego	159
7.3.3	Dobór okresu próbkowania dla regulatora dyskretnego	160

7.4	PRZYKŁAD PROJEKTOWANIA REGULATORA CYFROWEGO	161
8.	SYNTEZA UKŁADU NIELINIOWEGO, OPTIMALIZACJA I WERYFIKACJA URA	171
8.1	WSTĘP: CELE I METODY	171
8.1.1	Synteza parametryczna nieliniowego URA	172
8.2	MODEL KOMPUTEROWY	173
8.2.1	Przygotowanie nieliniowego modelu komputerowego do badań	173
8.2.2	Budowa modelu komputerowego	173
8.2.3	Wybór modeli sygnałów sterujących i zakłóceń	174
8.2.4	Uruchomienie modelu komputerowego	175
8.3	SPRAWDZENIE CHARAKTERYSTYKI STATYCZNEJ MODELU UKŁADU OTWARTEGO, BEZ REGULATORA.....	175
8.4	BADANIE STABILNOŚCI ORAZ WŁAŚCIWOŚCI WEJŚCIOWO – WYJŚCIOWYCH.....	176
8.5	BADANIE SKUTECZNOŚCI TLUMIENIA ZAKŁÓCEŃ.....	177
8.6	SYNTEZA UKŁADU	179
8.6.1	Poprawa stabilności	179
8.6.2	Optymalizacja właściwości URA ze względu na jakość procesu przejściowego	179
8.7	CELE WERYFIKACJI.....	180
8.7.1	Badanie	180
8.7.2	Sprawdzenie właściwości URA w stanach nieustalonych, wywołanych zmianą sygnału wartości zadanej $y_{zad}(t)$	181
8.7.3	Sprawdzanie własności dynamicznych w domenie częstotliwości	182
8.7.4	Określenie częstotliwości granicznej ω_g	183
8.8	BADANIE ODPORNOŚCI (KRZEPKOŚCI) URA	183
9.	PROJEKTOWANIE URA W MATLAB'IE – PRZYKŁADY	184
9.1	WSTĘP	184
9.2	ZALECANA KOLEJNOŚĆ CZYNNOŚCI	184
9.3	PRZYKŁAD 1: REGULACJA TEMPERATURY W KOTLE: OPIS ZADANIA	187
9.3.1	Opis obiektu (procesu)	187
9.3.2	Cel sterowania	188
9.3.3	Wymagania	188
9.3.4	Zakłócenia	188
9.4	PROJEKT WSTĘPNY UKŁADU	189
9.4.1	Wielkość sterująca	189
9.4.2	Koncepcja układu	189
9.4.3	System aparaturowy (patrz Rys. 9.4)	189
9.5	SKONFIGUROWANIE SYSTEMU KOMPUTEROWEGO	190
9.6	PROJEKT OBIEKTU STEROWANIA: OBLICZENIA STATYCZNE	191
9.6.1	Obliczenie zapotrzebowania na gaz	191
9.6.2	Projekt instalacji gazowej	191
9.6.3	Obliczenie zaworu regulacyjnego	193
9.7	PROJEKTOWANIE URZĄDZENIA WYKONAWCZEGO	196
9.8	MODELE MATEMATYCZNE I KOMPUTEROWE	196
9.8.1	Podział na bloki: schemat blokowy	196
9.8.2	Model układu zasilania palników	197

9.8.3 Model palników i wymiennika ciepła	203
9.8.4 Model zaworu	204
9.8.5 Model siłownika	206
9.8.6 Model przetwornika elektro – pneumatycznego	207
9.8.7 Model czujnika i przetwornika pomiarowego	209
9.9 CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE PROCESU (OBIEKTU): OD STEROWANIA I OD ZAKŁÓCEŃ.....	210
9.9.1 Wstępne badanie regulowanego procesu	211
9.9.2 Wyznaczanie charakterystyki statycznej obiektu	213
9.9.3 Linearyzacja obiektu	215
9.10 ZLINEARYZOWANY UKŁAD ELEMENTÓW FUNKCJONALNIE NIEZBĘDNYCH.....	215
9.10.1 Transmitancja obiektu $KG_{ob} = \frac{T(s)}{h_{wzgl}(s)}$	216
9.10.2 Transmitancja siłownika $KG_{sil} = \frac{h_{wzgl}(s)}{p_s(s)}$	216
9.10.3 Transmitancja przetwornika elektro–pneumatycznego	217
9.10.4 Transmitancja toru pomiarowego	217
9.10.5 Transmitancja linii sygnałowej	217
9.11 WZMOCNIENIE UKŁADU OTWARTEGO BEZ REGULATORA.....	218
9.12 ANALIZA BŁĘDÓW STATYCZNYCH.....	218
9.12.1 Ustalenie potrzebnego wzmocnienia układu otwartego ze względu na błędy statyczne od zakłóceń	219
9.13 SYNTEZA REGULATORA ZE WZGLĘDU NA WŁASNOŚCI DYNAMICZNE (DLA UKŁADU ZLINEARYZOWANEGO)	220
9.13.1 Wstęp	220
9.13.2 Zlinearyzowany model układu elementów funkcjonalnie niezbędnych	221
9.13.3 Modelowanie opóźnień transportowych	221
9.13.4 Ustalenie potrzebnego wzmocnienia układu otwartego ze względu na własności dynamiczne URA	225
9.13.5 Określenie nastaw regulatora PID w układzie zlinearyzowanym	226
9.13.6 Model komputerowy regulatora PID	229
9.13.7 Transmitancja układu otwartego	230
9.13.8 Wrażliwość statyczna (układu liniowego)	231
9.13.9 Wrażliwość dynamiczna: częstotliwościowy wskaźnik jakości regulacji (układu liniowego)	232
9.13.10 Podsumowanie syntezy układu zlinearyzowanego	233
9.14 SYNTEZA KONSTRUKCJI URA – NIELINIOWEGO – Z ZAPROJEKTOWANYM REGULATOREM.....	233
9.14.1 Wstęp	233
9.14.2 Plan działań	233
9.14.3 Sprawdzenie obiektu regulacji	234
9.14.4 Przygotowanie modelu URA do badań	235
9.14.5 Uruchomienie modelu	238
9.14.6 Sprawdzenie charakterystyki statycznej modelu układu otwartego, bez regulatora	240
9.14.7 Badanie właściwości wejściowo – wyjściowych	241
9.14.8 Badanie zapasu stabilności	243
9.14.9 Przygotowanie modelu zakłóceń do badań	244
9.14.10 Zdolność tłumienia zakłóceń	246
9.14.11 Optymalizacja	248
9.14.12 Wnioski z badania układu nieliniowego	251
9.15 WERYFIKACJA WŁASNOŚCI URA – NIELINIOWEGO – Z REGULATOREM PID	252
9.15.1 Charakterystyka wejściowo – wyjściowa	252

9.15.2 Zdolność tłumienia zakłóceń	255
9.16 BADANIE ODPORNOŚCI (KRZEPKOŚCI) UKŁADU (ROBUSTNESS)	257
9.17 PODSUMOWANIE SYNTEZY I BADANIA UKŁADU NIELINEARYZOWANEGO	257
9.18 PODSUMOWANIE PRZYKŁADU	258
9.18.1 Wnioski rzeczowe	258
9.18.2 Wnioski metodologiczne	258
ZAŁĄCZNIK C – DOKŁADNOŚĆ STATYCZNA	260
ZAŁĄCZNIK ES – REPREZENTACJA UKŁADU DYNAMICZNEGO NA PŁASZCZYŹNIE ZMIENNEJ S	271
ZAŁĄCZNIK F – KLASYCZNE REGUŁY NASTAWIANIA REGULATORA	286
ZAŁĄCZNIK H – PODSTAWOWE NARZĘDZIA MATLAB’A W ZAKRESIE CACSD	293
ZAŁĄCZNIK L – MODELOWANIE ZAKŁÓCEŃ	302
ZAŁĄCZNIK NCD – OPTYMALIZACJA URA W MATLAB’IE ZE WZGLĘDU NA ODPOWIEDŹ CZASOWĄ	312
ZAŁĄCZNIK OP – MODELOWANIE OPÓŹNIENIA W MATLAB’IE	318
ZAŁĄCZNIK PREDYKC – STEROWANIE PREDYKCYJNE	321
ZAŁĄCZNIK Q – CZĘSTOTLIWOŚCIOWY WSKAŹNIK JAKOŚCI REGULACJI	327
ZAŁĄCZNIK SPRAWOZD – SPRAWOZDANIE Z PROJEKTOWANIA URA	333
ZAŁĄCZNIK SZ – WŁASNOŚCI UKŁADÓW Z UJEMNYM SPRĘŻENIEM ZWROTNYM	336
ZAŁĄCZNIK ZAS – MODELOWANIE UKŁADU WYKONAWCZEGO (ZASILAJĄCEGO) Z ZAWOREM REGULACYJNYM	342
LITERATURA	355
SKOROWIDZ	358