

# Podstawowe układy regulacyjne



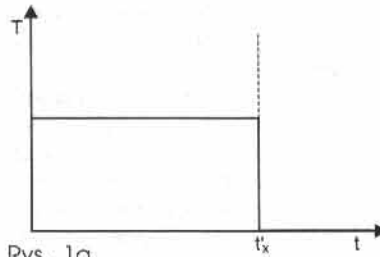
Zbudowanie dobrze działającego regulatora jest wielkim wyzwaniem dla każdego konstruktora. W tym odcinku „Notatnika Praktyka” omówimy problemy związane z doбором parametrów regulatora. Rozważany przez nas problem polega na stabilizacji temperatury, ale dokładnie takie same trudności powstają w wielu innych procesach fizycznych.

Gdyby komuś z Czytelników ten fragment „Notatnika Praktyka” wydał się zbyt teoretyczny, to warto przypomnieć słowa wielkiego fizyka Boltzmana, że nie ma rzeczy bardziej praktycznej niż teoria.

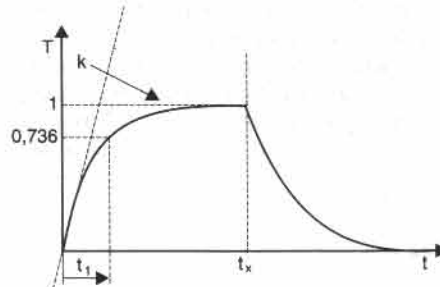
Każdy rzeczywisty obiekt ma swoją charakterystykę cieplną. Charakterystykę takiego obiektu można opisać matematycznie w postaci odpowiednich równań. Jak pokazuje życie, nie będą to typowe dla szkół średnich funkcje potęgowe (wielomiany  $n$ -tego stopnia), do opisu używa się rachunku różniczkowego i całkowego. Co bardziej uczulonych na wzory Czytelników chcemy uspokoić: nie zamierzamy przedstawiać przerażających tasiełcowych równań. Chcemy tylko zasignalizować, że przy doborze parametrów regulacji w naprawie wymagających procesach nie można liczyć na intuicję. Wyobraźmy sobie piec używany w procesie dyfuzji półprzewodników gdzie przy ciągłym cyklu pracy trzeba zapewnić dokładność temperatury  $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ . Dobieranie parametrów regulacji w takim przypadku naprawdę wymaga solidnej wiedzy i doświadczenia.

My nie będziemy porywać się na takie ambitne zadania. Dlatego chcemy jak najprościej przedstawić elementarne podstawy, które pomogą zupełnie niezorientowanemu w temacie przeprowadzić sensowne próby optymalizowania parametrów budowanego regulatora.

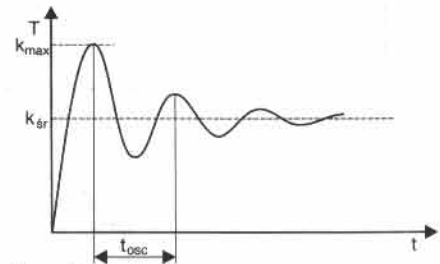
Załóżmy, że grzałki naszego (zimnego na początku) obiektu zasiliłyśmy pełną mocą, a po czasie



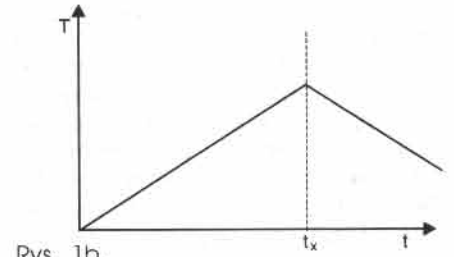
Rys. 1a.



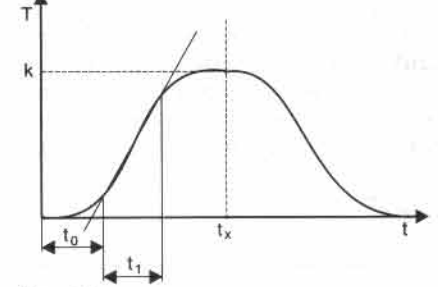
Rys. 1c.



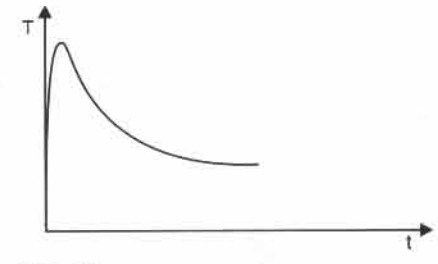
Rys. 1e.



Rys. 1b.



Rys. 1d.



Rys. 1f.

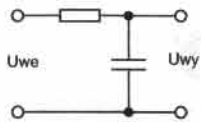
tx grzanie wyłączamy. Jak będzie wzrastała i opadała temperatura w interesującym nas punkcie wejścia obiektu? Na pewno nie według **rysunku 1a**, nie według **1b**, zazwyczaj także nie według **1c**. Ale stop! Krzywe z **rysunku 1c** coś nam przypominają. Oczywiście jest to znana z każdego podręcznika elektroniki charakterystyka szeregowego obwodu RC - patrz **rysunek 2a**. Gdyby zmiany temperatury były właśnie takie jak na **rysunkach 1a - 1c**, to bez trudu potrafilibyśmy je opisać za pomocą stosunkowo prostych równań, czy jeszcze prościej, wprowadzając pojęcie wzmocnienia i stałej czasowej obiektu (analogicznie do stałej czasowej RC w obwodzie elektrycznym). Obiekt o charakterystyce z rys. 1c nazwie-

**Chcemy tylko zasignalizować, że przy doborze parametrów regulacji w naprawie wymagających procesach nie można liczyć na intuicję.**

my obiektem inercyjnym pierwszego rzędu i do jego opisu wystarczy wartość stałej czasowej  $t_1$  oraz wzmocnienia  $k$ , które na rysunku jest reprezentowane przez wysokość prostoliniowej, ustalonej części charakterystyki nad osią poziomą. Możemy też mówić o nachyleniu narastającej części wykresu do osi poziomej, co też jest związane ze stałą czasową.

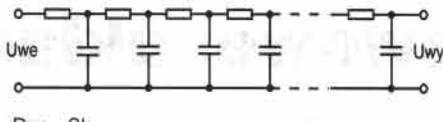
W naszym przypadku pieca też możemy mówić o wzmocnieniu, bo podając wielkość wejściową - moc grzania uzyskamy wielkość wyjściową - temperaturę, i właśnie temperatura maksymalna odniesiona do mocy grzania charakteryzuje tak niecodziennie pojęte wzmocnienie.

W rzeczywistym układzie zmiany temperatury będą wyglądać jak



Rys. 2a.

na **rysunku 1d**. Nie wdając się w szczegóły powiedzmy tylko, że taką charakterystykę ma obiekt powstający ze złożenia dużej ilości członów inercyjnych pierwszego rzędu. A właśnie wszelkiego rodzaju piece i grzejniki ze względu na ich budowę możemy traktować jako połączenie wielu podstawowych członów inercyjnych. Mówimy wtedy o elementach wyższych rzędów. Oczywiście poszczególne stałe czasowe wcale nie muszą być i zwykle nie są jednakowe. Elektryczną analogią (modelem) będzie układ z **rysunku 2b**. Jego charakterystyka wypadkowa będzie oczywiście zależać od ilości członów składowych i ich parametrów. Przy większej ilości



Rys. 2b.

członów powstaje swego rodzaju linia opóźniająca. Taki obiekt jest trudny do dokładnego opisu, ale w miarę dokładnie charakteryzują go trzy parametry pokazane na **rysunku 1d**: czas opóźnienia  $t_0$ , stała czasowa integracji  $t_1$  i wspomniane wcześniej wzmocnienie  $k$ .

Popatrzmy jeszcze na **rysunek 1e**. Przy grzaniu pieca stałą mocą (grzałki załączone na stałe) takich zmian temperatury nigdy nie uzyskamy. Ale przy zastosowaniu regulatora bardzo często otrzymamy taki przebieg zmian temperatury. W tym wypadku do matematycznego opisu należałoby podać wartość przeregulowania, czyli maksymalną odchyłkę ponad wartość ustaloną, a także okres pojawiających się drgań (w tym przypadku są to drgania tłu-

mione).

Obiekt lub element o takiej charakterystyce nazywamy oscylacyjnym.

W dotychczas podanych przypadkach charakteryzowaliśmy obiekt za pomocą jego odpowiedzi na skokową zmianę na wejściu. Identyfikatorna metoda jest bardzo często stosowana przez elektroników do badania charakterystyki wzmacniacza: na wejście podaje się przebieg prostokątny, zazwyczaj o częstotliwości 1kHz i przy odrobinie wprawy na podstawie przebiegu wyjściowego można narysować przebieg charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej tego wzmacniacza.

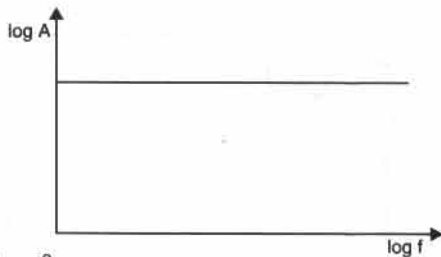
Przejdźmy więc do charakterystyk amplitudowych i fazowych. Gdyby odpowiedź układu na impuls była jak na **rysunku 1a**, to charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa wyglądałaby jak na **rysunku 3a** - dla wszystkich częstotliwości wzmocnienie jest tu jednakowe. Obie wielkości: wzmocnienie i częstotliwość podane są na **rysunku 3** w mierze logarytmicznej.

Nasz obiekt miałby charakterystykę szerokopasmową, schemat elektryczny układu o analogicznych właściwościach pokazany jest na **rysunku 4a**. Dodajmy, że przykłady z **rysunku 4** zawierają wzmacniacz operacyjny odwracający, więc sygnały wejściowy i wyjściowy są odwrócone, ale nie zmienia to istoty sprawy.

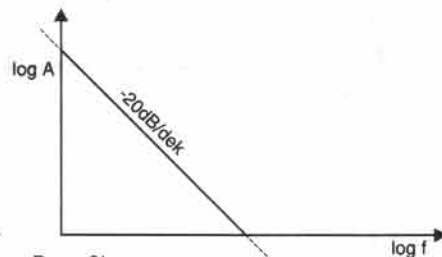
Gdyby charakterystyka wyglądała jak na **rys. 1b**, to mielibyśmy do czynienia z idealnym elementem całkującym - **rysunki 3b, 4b**. W takim układzie wzmocnienie maleje wraz z częstotliwością, a przesunięcie fazy jest stałe i wynosi -90 stopni.

Z kolei jeśli odpowiedź układu na impuls była jak na **rysunku 1f**, to mamy do czynienia z obiektem o charakterystyce różniczkowej. Wielkość sygnału wyjściowego jest tu proporcjonalny do częstotliwości, a przesunięcie fazy wynosi +90 stopni. Charakterystykę częstotliwościową i idealny układ różniczkujący pokazują **rysunki 3c i 4c**.

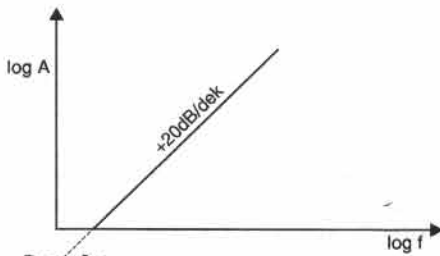
**Rysunki 3d i 4d** dotyczą często spotykanego w praktyce układu różniczkującego (wyprzedzającego). Do pewnej częstotliwości granicznej wzmocnienie jest stałe, powyżej tej częstotliwości rośnie z szybkością 20dB/dekadę. Tu możemy mówić o wzmocnieniu dla małych częstotliwości oraz o częstotliwości gra-



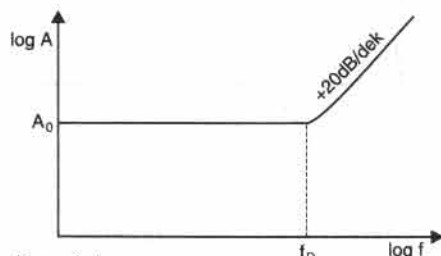
Rys. 3a.



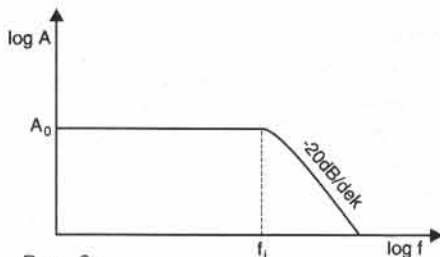
Rys. 3b.



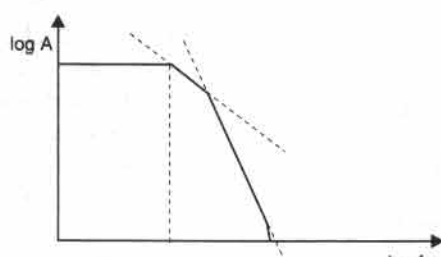
Rys. 3c.



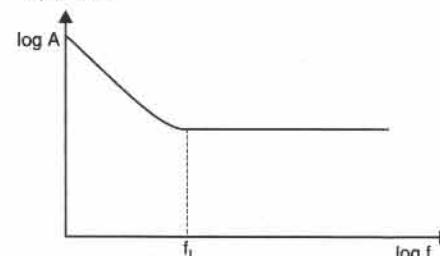
Rys. 3d.



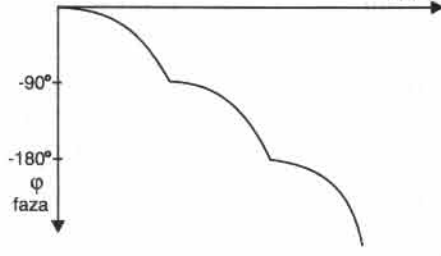
Rys. 3e.



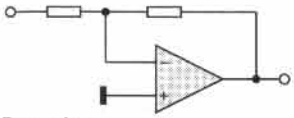
Rys. 3f.



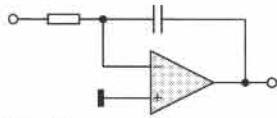
Rys. 3g.



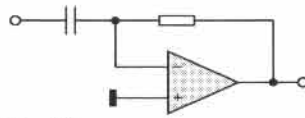
Rys. 3h.



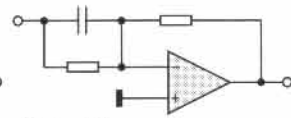
Rys. 4a.



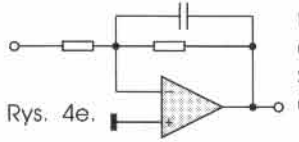
Rys. 4b.



Rys. 4c.



Rys. 4d.



Rys. 4e.

nicznej (a także o związanej z tym stałej czasowej).

Następne rysunki:

**3e i 4e** dotyczą często spotykanego członu inercyjnego (opóźniającego) pierwszego rzędu. Powyżej częstotliwości granicznej (związanej ściśle ze stałą czasową) wzmocnienie spada z szybkością 20dB/dekadę, a faza zmienia się od 0 do -90 stopni. Dla układu z **rys. 3d** faza zmienia się analogicznie od 0 do +90°.

Pojedynczy człon inercyjny może więc przesunąć fazę o co najwyżej -90 stopni, ale element drugiego rzędu już o blisko -180 stopni, trzeciego rzędu - prawie -270 stopni ... itd. Przykładową charakterystykę częstotliwościową i fazową obiektu wyższego rzędu narysowaliśmy na **rysunku 3f**. Charakterystyka amplitudowa opada tu szybciej niż na **rys. 3e**, ale i zmiany fazy są o wiele większe.

I wreszcie doszliśmy do ważnego wniosku.

Idealne warunki regulacji mieliśmy, gdyby nasz obiekt miał charakterystykę jak na **rys 1a** - podanie mocy grzania wywoływałoby natychmiastowe zmiany temperatury. Nigdy tak nie jest, więc zawsze stosujemy czujnik temperatury, układ porównujący wartość temperatury bieżącej i zadanej, układ regulatora, który koryguje ilość mocy podawaną do układu, aby osiągnąć zadaną temperaturę. Wprowadzamy też jakiś element wykonawczy zmieniający ilość doprowadzonej do obiektu mocy. Zawsze tworzymy wtedy układ ze sprzężeniem zwrotnym - blokowy schemat pokazany jest na **rysunku 5a i 5b**.

I tu aż prosi się odpowiedzieć na pytanie: jaką charakterystykę ma mieć regulator, aby osiągnąć najlepsze rezultaty? Odpowiedź jest bardzo prosta, tyle, że... niewykonalna w praktyce: Regulator powinien mieć charakterystykę

dopełniającą (czy uzupełniającą, odwrotną) w stosunku do charakterystyki obiektu, taką aby wypadkowa charakterystyka połączonych szeregowo regulatora i obiektu była linią prostą jak na **rysunku 1a**. Wtedy zmiana temperatury zadanej wywołałaby natychmiastową zmianę temperatury pieca.

Ponieważ jednak rzeczywisty obiekt ma charakterystykę wyższego rzędu, bardzo złożoną, więc nie potrafimy dobrać charakterystyki regulatora, aby osiągnąć pełne „wyprostowanie” charakterystyki wypadkowej. Rozumiemy to też intuicyjnie, że nie można momentalnie zmienić temperatury pieca z uwagi na występujące bezwładności i opóźnienia, które przed chwilą omawialiśmy z matematycznego punktu widzenia. Teraz widzimy dokładnie, że jeśli wymagania odnośnie dokładności regulacji są wysokie, to dobór charakterystyki regulatora jest sprawą bardzo trudną. Należałoby zaprojektować układ, który potrafiłby przewidzieć reakcję obiektu grzejnego i wcześniej podać odpowiednią wartość mocy na układ, a to nie jest do końca możliwe.

Do tej pory braliśmy pod uwagę tylko, jak system regulacji reaguje na zmianę wartości zadanej. W praktyce zazwyczaj ważniejsze jest pytanie jak system reaguje na pojawiające się różnorodne zakłócenia, choćby nierównomierne odbieranie ciepła z obiektu grzejnego. Rozważania tego problemu są jeszcze bardziej skomplikowane, ale na szczęście wiążą się one z omówionymi charakterystykami i w pierwszym przybliżeniu możemy je pominąć.

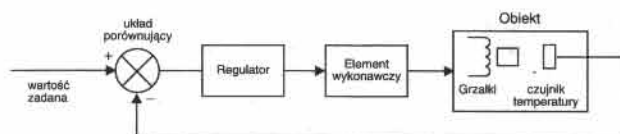
Zanim przejdziemy do wskazówek praktycznych powiedzmy kilka

słówo o elemencie wykonawczym. Przy zastosowaniu dwustanowego regulatora opisanego w EP11/93 do grzałek doprowadzamy pełną moc bądź grzałki odłączamy. Przy takim sposobie działania temperatura będzie się ciągle wahać między wartościami maksymalną i minimalną, zależnymi od ustawionej histerezy. Bardzo często taki prosty sposób całkowicie wystarcza, ale co zrobić, gdy chcemy utrzymywać zadaną temperaturę z większą dokładnością? Trzeba oczywiście płynnie zmieniać moc grzania, dostosowując ją do aktualnych warunków. Przy mniejszych mocach wykorzystujemy zazwyczaj prąd stały, przy większych prąd zmienny.

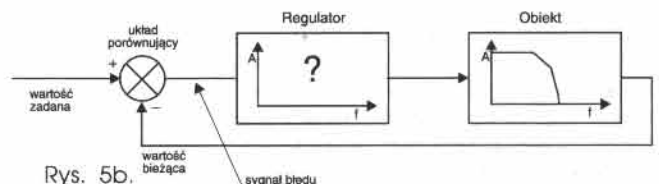
**Dla uzyskania małego błędu regulacji należy ustawić możliwie dużą wartość wzmocnienia regulatora. Nie można jednak nadmiernie zwiększać wzmocnienia, bo grozi to powstaniem oscylacji i wzbudzeniem się całego systemu.**

Początkujący elektronicy proponują pewnie od razu sposób polegający na sterowaniu fazowym triaków czy tyrystorów. W praktyce sposobu tego należy jak najstaranniej unikać. Ze sterowaniem fazowym wiąże się wytwarzanie silnych zakłóceń w sieci energetycznej i zakłóceń radiowych, co przy większych mocach w warunkach amatorskich jest bardzo trudne do opanowania.

Sterowanie fazowe może być niezbędne w specjalnych, sporadycznych przypadkach - jednak obiekty i procesy grzejne mają stałe czasowe co najmniej rzędu kilku sekund, a najczęściej jeszcze dłuższe, wobec czego z powodzeniem można stosować sterowanie grupowe triaków i tyrystorów z wyzwaniem „w zerze sieci”. W tym celu najczęściej stosuje się układ sterujący o stałym okresie cyklu i zmiennym współczynnikiem wypełnienia. Jeśli okres cyklu będzie znacznie mniejszy od stałej czasowej obiektu to obiekt „nie dostrzeże”, że regulacja jest w rzeczywistości dwustanowa, i „widzi” tylko wartość

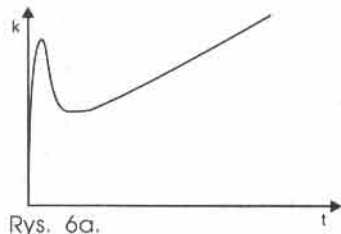


Rys. 5a.

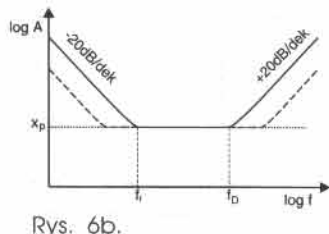


Rys. 5b.

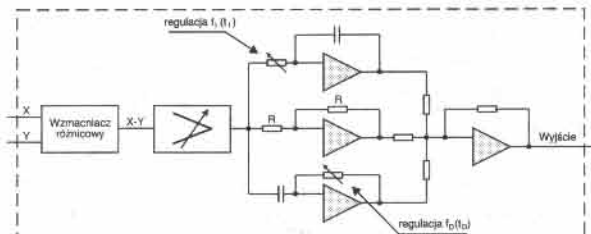




Rys. 6a.



Rys. 6b.



Rys. 6c.

uśrednioną. Tak więc dobierając odpowiednio krótki okres cyklu pracy uzyskujemy regulator proporcjonalny z wyjściem dwustanowym. Niektóre firmy stosują do tego typu regulatorów jako elementy wykonawcze styczniki lub przekaźniki. Jest to rozwiązanie zdecydowanie gorsze, szczególnie przy większych mocach, z uwagi na ograniczoną trwałość styków.

Wróćmy teraz do tematu praktycznego doboru charakterystyki regulatora.

Przyjmujemy, że mamy regulator proporcjonalny, a nie dwustanowy i chcemy jak najdokładniej utrzymać potrzebną temperaturę. Niech grzałki sterowane będą prądem stałym regulowanym przez tranzystory. W najprostszym przypadku nasz regulator będzie wzmacniaczem według rysunku 4a.

Taki układ nazywa się regulatorem typu P (proporcjonalny). Wygląda na to, że czym większe wzmocnienie nasze-

go regulatora, tym mniejszy błąd. Rzeczywiście, jeśli sygnał błędu (rys. 5a, b) zostanie znacznie wzmocniony, to małe odchyłki od temperatury zadanej wywołają duże zmiany doprowadzonej mocy i odchyłka zostanie skorygowana. Owszem, ale przy zbyt dużym wzmocnieniu pojawiają się oscylacje i system wzbudzi się na jakiejś częstotliwości - temperatura będzie się wahać w niedopuszczalnie szerokich granicach. Dlaczego system się wzbudzi?

Mówiliśmy, że w układzie wyższego rzędu (a takim jest nasz piec) wzmocnienie powyżej częstotliwości granicznej szybko spada, ale występuje przy tym duże przesunięcie fazy. Przesunięcie fazy o 180 stopni oznacza oczywiście zmianę sprzężenia zwrotnego z ujemnego na dodatnie. Jeśli więc nasz regulator wniesie do systemu duże wzmocnienie, to niewątpliwie okaże się, iż dla częstotliwości przy której przesunięcie fazy wynosi 180° całkowite wzmocnienie będzie

większe od jedności i system wzbudzi się. Ponieważ rzeczywiste obiekty są układami wyższego rzędu więc przy zbyt dużym wzmocnieniu na pewno się wzbudzą.

Przy ustawieniu wzmocnienia „na pograniczu“ uzyskamy charakterystykę oscylacyjną, taką jak na rysunku 1e. Okres oscylacji będzie zależał od stałych czasowych obiektu (praktycznie będzie to częstotliwość, przy której przesunięcie fazy na charakterystyce amplitudowo-fazowej - rys. 3f wynosi -180°). Czym większe wzmocnienie, tym słabsze będzie tłumienie oscylacji, przy dalszym zwiększaniu wzmocnienia pojawią się trwałe wahania temperatury.

Tu notujemy ważny wniosek praktyczny: nie należy nadmiernie zwiększać wzmocnienia regulatora, bo grozi to powstaniem oscylacji.

W pewnych przypadkach chcemy uzyskać jak najmniejszy błąd statyczny i chcielibyśmy, żeby wzmocnienie dla prądu stałego było jak największe. Możemy ukształtować charakterystykę częstotliwościową naszego regulatora według rysunku 3g. Będzie to regulator proporcjonalno-całkujący nazywany w skrócie PI. Jeżeli ustalimy częstotliwość graniczną naszego regulatora  $f_1$  poniżej częstotliwości granicznej obiektu, to w efekcie polepszymy parametry w zakresie mniejszych częstotliwości. W zakresie większych częstotliwości regulator PI będzie mieć parametry takie, jak regulator typu P.

Z kolei jeśli chcemy uzyskać zwiększenie szybkości regulacji, to możemy zastosować regulator proporcjonalno-różniczkujący, tzw. PD według rysunku 3d, 4d. Jeśli na wejściu układu z rys. 4d sygnał błędu będzie się zmieniał, to sygnał wyjściowy będzie złożeniem składowej proporcjonalnej wynikającej ze stosunku  $R2/R1$  oraz składowej proporcjonalnej do szybkości zmian wynikającej z przepływu prądu

przez kondensator C i rezystor R2. Nie bez powodu więc element różniczkujący nazywamy przyspieszającym (zobacz też rysunek 1f).

Ale nie ma róży bez kolców. Wzmocnienie regulatora PD rośnie wraz z częstotliwością, co powoduje nadmierne wzmocnianie składowych o dużych częstotliwościach: wszechobecnych szumów i innych „śmieci“. Może to powodować inne błędy regulacji i dlatego w praktyce regulatory PD są używane tylko w układach gdzie najistotniejsza jest szybkość regulacji.

Kolejnym krokiem jest złożenie wszystkich trzech elementów - otrzymujemy wtedy regulator typu PID. Zapewnia on najlepsze parametry regulacji, ale najtrudniej dobrać jego parametry do danego obiektu. Produkowane są profesjonalne regulatory typu PID, umożliwiające za pomocą pokręteł niezależne ustawianie wzmocnienia (pokrętko oznaczane często  $k_r, x_p, Dx_p$  lub  $\%x_p$ ), czasu całkowania ( $T_i$  - nazywany czasem zdwojenia) i stałej czasu różniczkowania ( $T_d$  - czas wyprzedzenia). Odpowiedź na impuls skokowy takiego regulatora, jego charakterystykę częstotliwościową i przykładowy schemat elektryczny pokazano na rysunku 6a, b, c.

### Dobieranie parametrów regulatora w warunkach praktycznych

Jeśli chcemy uzyskać możliwie dobre parametry to na początek wystarczy zastosować po prostu regulator typu P. Należy zwiększać wartość wzmocnienia aż do wystąpienia trwałych, niegasnących oscylacji i potem dla bezpieczeństwa zmniejszyć wzmocnienie o 40...60%. Można też zwiększać wzmocnienie i sprawdzać odpowiedź systemu na skokową zmianę wartości zadanej. Przy pewnej wartości wzmocnienia otrzymamy odpowiedź o charakterze oscylacyjnym i wtedy korygując wzmocnienie możemy dobrać dopuszczalną wartość przeregulowania i czasu reakcji. I w większości przypadków to wystarczy.

Piotr Górecki, AVT