Regulacja automatyczna

TEORIA i PRAKTYKA STEROWANIA

Opracował: **Piotr Gałdyński**

ZESPÓŁ SZKÓŁ ELEKTRYCZNO-ELEKTRONICZNYCH
im. prof. Maksymiliana Tytusa Hubera w Szczecinie

SZCZECIN 2016

Spis treści

Wprowadzenie 1

CZĘŚĆ I – FIZYKA REGULACJI AUTOMATYCZNEJ

Rozdział I Obiekt inercyjny..... 5

Rozdział II Obiekt w układzie regulacji..... 8

Rozdział III Zawór i efektor..... 11

Rozdział IV Przypadek: Lokomotywa..... 15

Rozdział V Ćwiczenie praktyczne – energie..... 18

CZĘŚĆ II – MODEL SYGNAŁÓW STERUJĄCYCH

Rozdział I Model sygnałów sterujących..... 23

Rozdział II Regulator..... 26

Rozdział III Parametry regulowane..... 32

Rozdział IV Jakość regulacji..... 35

CZĘŚĆ III – HOMO CYBERNETICUS

Rozdział I Palacz..... 41

Rozdział II Maszynista..... 48

Rozdział III Sternik..... 55

SUPLEMENT - INSTRUKCJE ĆWICZEŃ

E-podręcznik skojarzony z podręcznikiem:

Urządzenia i systemy mechatroniczne, REA 2009

Rysunki i wykresy: Piotr Gałdyński

Zamieszczone w publikacji Ilustracje pochodzące z sieci Internet funkcjonują w domenie publicznej i wedle wiedzy autora nie zostały objęte restrykcjami dotyczącymi ich niekomercyjnego wykorzystania. W przypadku ewentualnych zastrzeżeń właściciela praw do ilustracji, dotyczących jej wykorzystania w niniejszej publikacji prosimy o kontakt: pgaldynski@op.pl lub szkola@tme.szczecin.pl

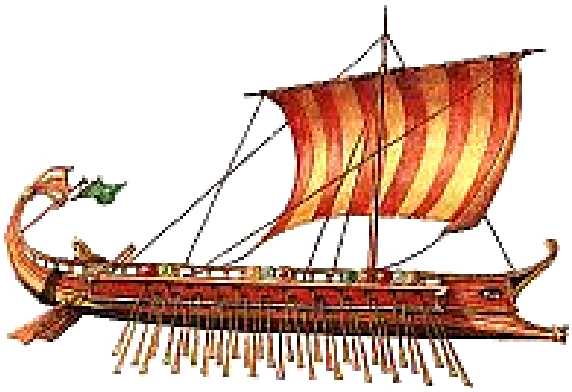
Projekt okładki i układ tekstu: Dariusz Mostowski

Niniejsza, elektroniczna wersja podręcznika może być swobodnie rozpowszechniana niekomercyjnie w celach edukacyjnych wyłącznie w całości, z zachowaniem zawartych w niej informacji o prawach autorskich.

Wprowadzenie

Dawno, dawno, temu… Dawid, strzelając z procy, trafił kamieniem w głowę Goliata. Dawid nie był niegrzecznym chłopcem – był żołnierzem na wojnie. Umiał strzelać z procy. Do dzisiaj podziwiamy odwagę małego chłopca, który pokonał potężnego Goliata. Możemy podziwiać również sprawność, z jaką wystrzelił kamień, który trafił w skroń Goliata. Nie używał stacji radarowej, dalmierza, przeliczników komputerowych. Przez wielokrotne strzelanie z procy jego system nerwowy zaadaptował się i stworzył algorytm działania, pozwalający trafić tak precyzyjnie i z taką siłą.

Najstarsze greckie opisy dotyczące sterowania wyrażają podziw dla sprawności sternika na okręcie. Bitwę morską pod Salaminą wygrała flota grecka z pięciokrotnie większą flotą perską dzięki sprawności manewrów, czyli mistrzostwu sterników. Bogiem wichrów i burz na morzu był wtedy Posejdon. Gdy przyszedł sztorm, życie podróżnych pozostawało dosłownie w rękach sternika. I to chyba wtedy powstało powiedzenie – „sternik na statku jest pierwszy po bogu".



Źródło: Internet

.

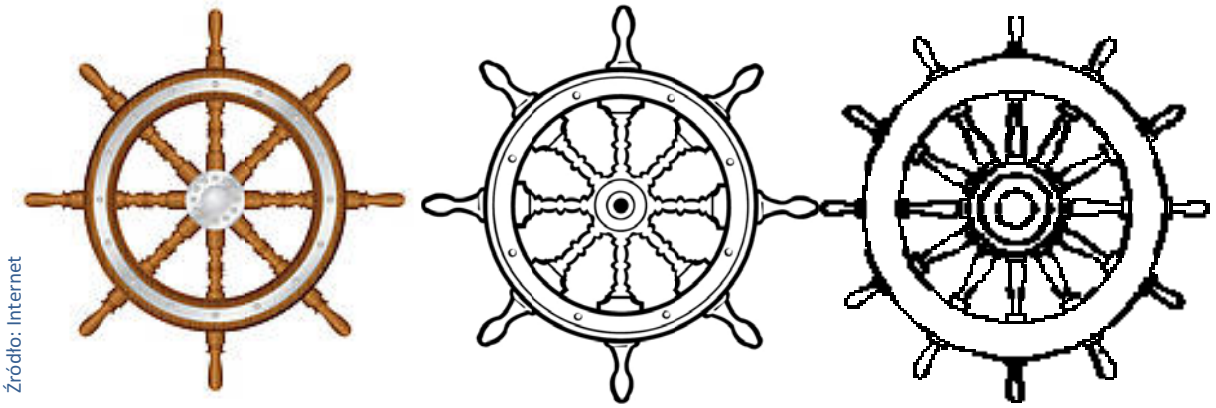
Nauka o sterowaniu – Cybernetyka – wzięła swoją nazwę od greckiej nazwy sternika. W ramach tej nauki opracowano i zbudowano urządzenie techniczne zastępujące sternika na statku i pilota w samolocie nazwane – autopilotem. Mimo to nadal wejście statku do portu, czy też start, jak i lądowanie samolotu, nie mogą się obyć bez układów sterowania, które ma w głowie człowiek.

Od pół wieku projektowanie układów sterowania posiada solidną teorię i opisy matematyczne. Jednak przez ostatnie tysiące lat sterowanie statkiem, rydwanem, wozem drabiniastym, kamieniem wystrzeliwanym z procy, oparte było na intuicji. Dzisiejsze próby zbudowania sterownika dla samochodu bez kierowcy, pokazują skalę trudności.

Wielkie korporacje wydają miliony, żeby stworzyć algorytm sterowania. My nadal posługując się intuicją i nawykiem, jeździmy autem, rowerem, hulajnogą, na wrotkach lub łyżwach.

Spróbujemy przyjrzeć się bliżej temu, co jest schowane poza naszą świadomością w naszej intuicji, a także odpowiedzieć na pytania: Jak działają układy sterowania? W jaki sposób regulator steruje parametrami obiektu? I dlaczego nie istnieje sterowanie bez sprzężenia zwrotnego? Wszystko po to, abyśmy się nie dziwili, że statek bez sternika wcześniej czy później osiądzie na mieliźnie lub rozbije się na skałach.

Zadaniem podręcznika jest opisanie zjawisk i pojęć dotyczących działu techniki nazywanego REGULACJĄ AUTOMATYCZNĄ. Dziedzina, którą zajmuje się regulacja automatyczna, powstała po drugiej wojnie światowej jako nauka ze swoją teorią i aparatem matematycznym. Największy rozwój urządzeń sterujących dokonał się w czasie wojny, przy okazji doskonalenia różnego rodzaju broni. Po ustaniu działań wojennych powstała nowa dyscyplina nauki – regulacja automatyczna, która zaczęła obejmować również działy techniki cywilnej. Rozwijając się, poszerzała swoje horyzonty o inne obszary związane ze sterowaniem. Obecnie całość nauki o sterowaniu nazywa się CYBERNETYKĄ i, oprócz zagadnień techniki, obejmuje również ducha wszelkiego sterowania, czyli dział TEORII SYSTEMÓW.



Źródło: Internet

A co było wcześniej przed powstaniem regulacji automatycznej jako nauki? Też były regulatory. Wydzielone urządzenia służące do sterowania maszynami. Ludzie budowali je na podstawie obserwacji zjawisk zachodzących w przyrodzie, własnych doświadczeń oraz kreatywności i intuicji. Tak powstał regulator Watta, utrzymujący obroty maszyny parowej na zadanym poziomie mimo zmian obciążenia. Bardziej dociekliwi ułatwiali sobie życie, wymyślając i budując różnego rodzaju udoskonalenia. Góral spod Liberca zbudował wóz drabiniasty, który w czasie zjeżdżania z góry samoczynnie hamował. Przednia oś z kołami i dyszlem była tak zamocowana do reszty wozu, że mogła się przesuwać w przód i w tył o kilkanaście centymetrów. Jeżeli koń ciągnął wóz, wóz jechał. Kiedy zjeżdżał z góry, reszta wozu przesuwała się do przodu i cięgno do niej przymocowane dociskało klocki hamulca do przednich kół. Im góra była bardziej stroma tym większa siła docisku, tym mocniejsze hamowanie.

A co było jeszcze wcześniej, kiedy nie było regulatorów jako odrębnych maszyn? Funkcję regulatora spełniał człowiek: woźnica, sternik, palacz, nastawiacz śluzy, maszynista itp.

Sterował maszynami, stosując algorytmy sterowania, które miał w głowie. Żaden opis matematyczny nie był mu potrzebny. Umiejętności sterowniczych nabywał z doświadczeniem. Ale sterowanie to nie tylko maszyny i urządzenia techniczne. W czasie zabawy jeździmy na rolkach, wrotkach, łyżwach czy fiszce, utrzymujemy równowagę i wykonujemy ewolucje, sterując algorytmami zapisanymi w naszej głowie. Jazda na rowerze, kopanie piłki, tenis, golf, to są dyscypliny sportu, w których stworzyliśmy tak doskonałe algorytmy sterowania, że nie potrafimy ich odtworzyć w urządzeniach technicznych.

Źródło: Internet

A co było jeszcze wcześniej, kiedy nie było na ziemi ludzi? Obserwując zachowania współczesnych zwierząt: zabawę kota z piłeczką, aportowanie psa, delfina czy konia, który odwozi śpiącego woźnice, z karczmy w sąsiedniej wsi do domu, widzimy perfekcyjne efekty procesów sterowania. Podobnie, obserwując świat roślin, widzimy również efekty sterowania. Drzewa rosnące na skraju lasu rozwijają gałęzie od strony światła. Wszystkie drzewa w tym lesie rosną pionowo do góry, co zauważymy, obserwując drzewa przewrócone za młodu, które rosnąc, wyginają pień do pionu. Pole słoneczników przez cały dzień wodzi swoje kwiaty za słońcem, obracając je o pół obrotu. Wiele innych kwiatów też to robi. Możemy podsumować, że w całej przyrodzie ożywionej sterowanie jest ważną funkcją związaną z zachowaniem życia.

Wracamy do współczesności i do świata techniki. W opracowaniu przedstawimy sposoby funkcjonowania układów i systemów regulacji automatycznej. Omówimy układy z regulatorem w formie urządzenia i, ze względów dydaktycznych, z regulatorem, będącym algorytmem w ludzkiej głowie. Chcielibyśmy przekazać Ci tyle wiedzy i namówić do wykonania tylu ćwiczeń, abyś mógł zrozumieć dziejące się w automatycznej regulacji zjawiska. Rozumiejąc, będziesz mógł analizować funkcjonowanie układów sterowania. Poznawać samodzielnie nowe rozwiązania i wykorzystać swoje umiejętności do budowania układów regulacji automatycznej.

Nasze rozważania rozpoczniemy od przedstawienia przemian energetycznych, zwłaszcza że prawie wszystkie parametry, które podlegają sterowaniu, zależą od stanu energetycznego obiektu.

CZĘŚĆ I

Fizyka regulacji automatycznej

Rozdział I

Obiekt inercyjny

Żeby zrozumieć procesy regulacji, zacząć musimy od poznania lub przypomnienia sobie przemian energetycznych, jakie zachodzą w świecie obiektów fizycznych, wykonanych z materii. Jak pamiętamy z fizyki, zgodnie z prawami dynamiki i termodynamiki, żeby zmienić parametry fizyczne materii, trzeba jej dodać lub ująć energii. Dostarczając energię do obiektu, np. podgrzewając go, zmieniamy również jego parametr fizyczny - temperaturę. Regulator, którego zadaniem jest wysterować któryś z parametrów obiektu, może to uczynić, zmieniając jedynie jego stan energetyczny. Podgrzewając płyn, możemy sterować jego temperaturą i lepkością. Podgrzewając gaz, sterujemy jego ciśnieniem. Rozpędzając pojazd za pomocą silnika, sterujemy jego prędkością. Wychylając ster, oddziałujemy siłą na rufę płynącego statku, sterując jego kursem.

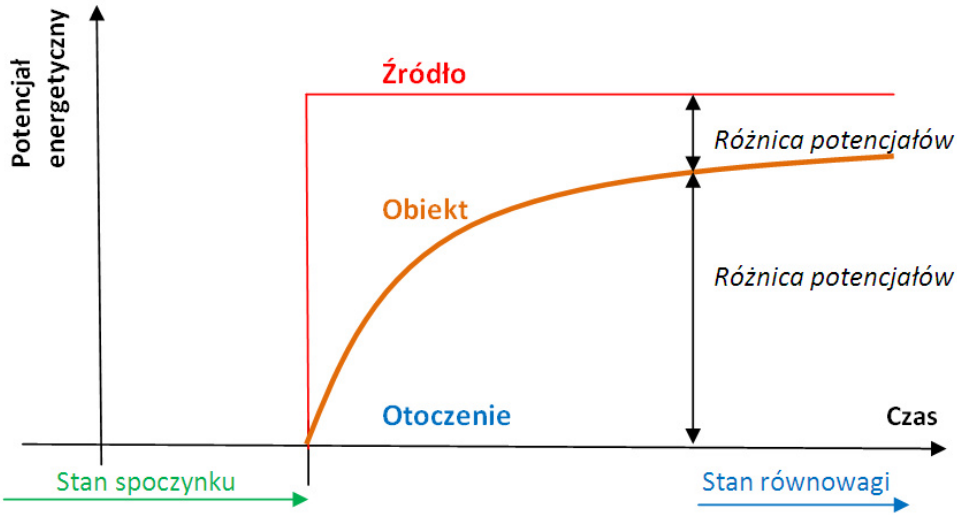
Wszystkie obiekty techniczne są wykonane z jakiegoś rodzaju materii. Ilość materii określamy w kilogramach [kg]. Z materią wiąże się bezwładność zwana **inercją**. Inercja to taka właściwość materii, która pozwala jej gromadzić energię. Jeżeli chcemy zmienić parametr **obiektu** materialnego, czyli jego stan energetyczny, to musimy do niego dostarczyć odpowiednią ilość energii. Można powiedzieć – energia przepływa do materialnego obiektu i tam się gromadzi czyli kumuluje. Obiekt ogrzewany kumuluje **energię cieplną** $E = c \times m \times \Delta T$, której ilość wynika z masy obiektu, pojemności cieplnej i osiąganej temperatury (parametr regulacji). Obiekt ruchomy **energię kinetyczną** $E = m \times v^2/2$, której ilość jest iloczynem masy przez prędkość (parametr regulacji) w kwadracie. Obiekt unoszony kumuluje **energię potencjalną** $E = m \times g \times h$, której ilość jest iloczynem masy przez wysokość (parametr) nad powierzchną spoczynku obiektu. Zauważmy, że we wszystkich wzorach występuje ścisła zależność między skumulowaną energią, a parametrem obiektu.

Sytuacja wyjściowa do analizy przemian energetycznych w procesach regulacji to dwa stany energetyczne obiektu. **Stan spoczynku** charakteryzuje się takim samym stanem energetycznym obiektu, jak i otoczenia. Nie występuje różnica potencjałów, różnica temperatur, różnica ciśnień. Obiekt nie porusza się względem otoczenia, spoczywa na podłożu. Drugi stan wynika z dostarczania energii do obiektu przez **efektor**. Efektor przemienia dostarczaną energię w taką postać energii, którą kumuluje obiekt, np. energię elektryczną grzałka przemienia w ciepło kumulowane przez wodę w trakcie podgrzewania, a silnik elektryczny w energię kinetyczną, kumulowaną w masie pojazdu.

Uruchamiając obiekt do pracy, będziemy dostarczać mu energię. Poziom energetyczny rośnie, rośnie parametr regulowany. **Stanem równowagi** zaś nazwiemy stan, w którym parametr regulowany będzie równy żądanej wartości.

ZAPAMIETAJ

Materia może gromadzić różnego rodzaju energie. **Przepływ energii odbywa się z punktu o wyższym potencjale do punktu o potencjale niższym.**

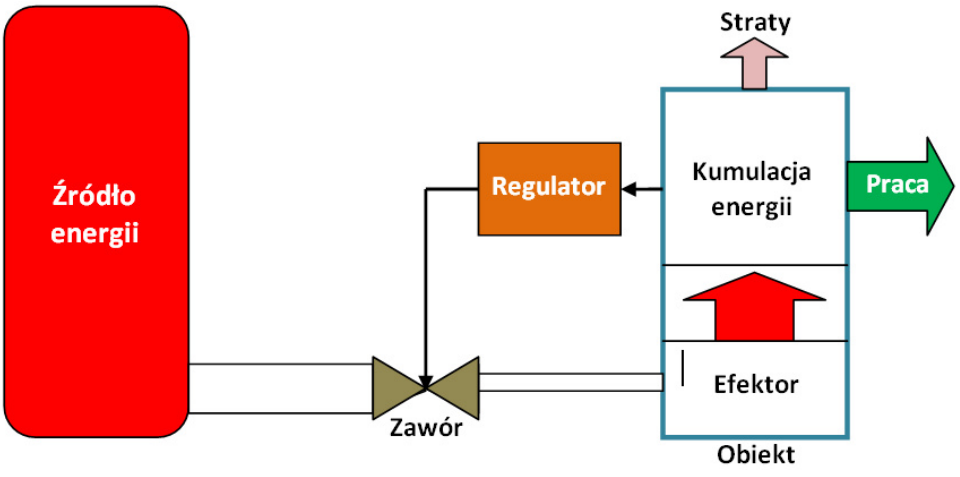


Różnica potencjałów energetycznych między źródłem a obiektem powoduje przepływ energii ze źródła do obiektu. Ale również różnica potencjałów między obiektem a otoczeniem, powoduje przepływ energii przez „izolację" do otoczenia, czyli **straty**. W układach regulacji prędkości energia kinetyczna obiektu zużywa się na pracę pokonania tarcia i na straty.

ZAPAMIETAJ

Obiekt poza stanem spoczynku zawsze rozprasza energię. Obiekt poruszający się na tarcie, cieplny przez promieniowanie, konwekcję, przewodność. Obiekt będzie znajdował się poza stanem spoczynku tak długo, jak długo będziemy dostarczali do niego energię. A pozostawiony samemu sobie dążył będzie do stanu spoczynku.

Rysunek: *Przepływ energii w układzie regulacji automatycznej*



Przepływ energii jest następujący. Ze *źródła energii* poprzez *zawór zadający* dostarczamy ją do *efektora*, a ten przekazuje energię do *obiektu*. **Każdy obiekt materialny posiada inercję, czyli własność gromadzenia/kumulowania energii**. Jeżeli zatem do, będącej w stanie spoczynku wody, dostarczymy do 1 kilograma 4,19 kJ energii cieplnej to temperatura wody podniesie się o 1 stopień Celsjusza. Wystąpi różnica temperatur między ogrzaną wodą a otoczeniem. Energia skumulowana w ciepłej wodzie zacznie przepływać do otoczenia. Im lepsza izolacja zbiornika z wodą, tym wolniejsza ucieczka traconej energii.

Funkcją **regulatora** zatem będzie dozowanie odpowiedniej ilości energii poprzez zawór do obiektu. Energia przez zawór dostaje się do efektora i przez efektor do obiektu. Regulator na swoim wejściu mierzy parametr, który podlega regulacji, a swoim wyjściem dozuje energię do obiektu. **Celem pracy regulatora będzie ustalenie takiej dawki energii, która spowoduje, że wartość parametru regulowanego osiągnie wartość żądaną**.

Jak już wcześniej opisaliśmy, zachodzi ścisła zależność między energią skumulowaną a parametrem regulowanym obiektu, wobec tego w praktyce nie operujemy pojęciem energii, tylko którymś z parametrów podlegającym regulacji. Np. mierzymy temperaturę wody w bojlerze, a nie energię wody, mimo że $E = c \times m \times \Delta T$ – ścisła zależność temperatury i energii. Podobnie z prędkością samochodu. Podajemy ją w kilometrach na godzinę, a nie w jednostkach energii kinetycznej, mimo że $E = m \times v^2 / 2$ – ścisła zależność prędkości od energii.

Wiemy już jak energia przepływa przez układ regulacji, możemy zatem wprowadzić pojęcie szybkości tego przepływu, czyli jak i ile przepływa energii w czasie. Ilość energii w jednostce czasu definiujemy jako **moc** wyrażaną w kJ/s lub kW. Zatem szybkość przepływu energii nazwiemy mocą. W układzie regulacji sterujemy mocą dostarczaną do obiektu, której część obiekt przeznacza na zmianę swojego poziomu energetycznego, czyli kumulację, a część zużywa na wykonanie pracy oraz pokrycie strat. Moc przeznaczona na kumulację jest magazynowana i może być odzyskana. Auto, które wjechało na górkę może zjechać z górki na „luzie", a samochody hybrydowe, zjeżdżając z górki, odzyskują energię hamowania.

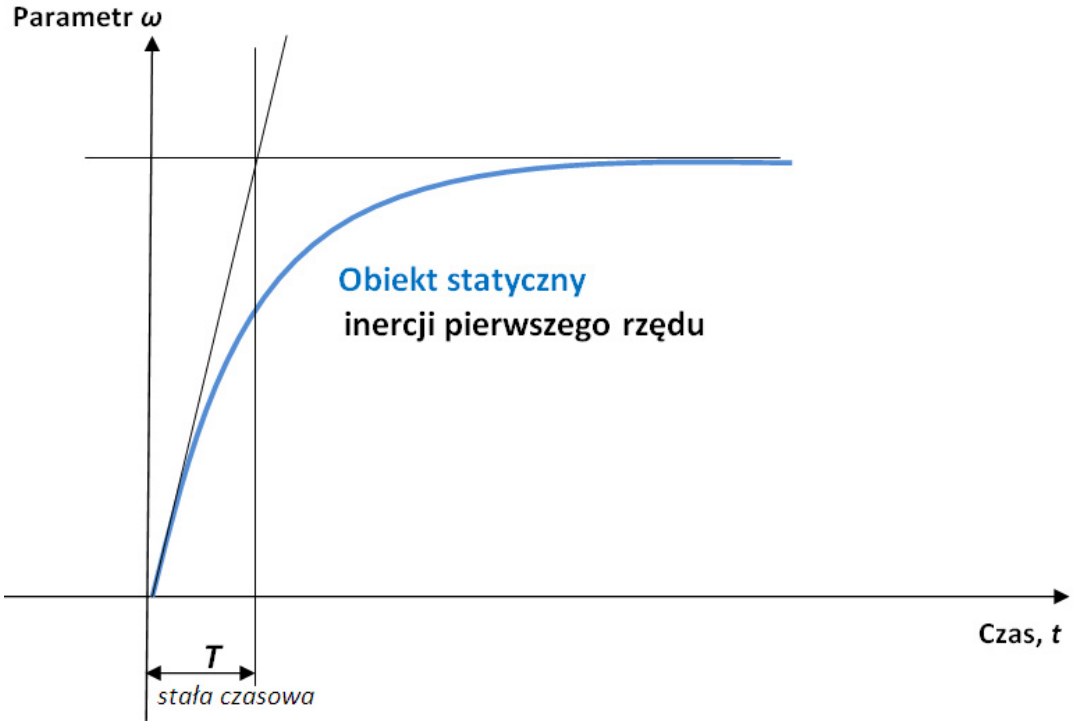
Moc przeznaczona na wykonanie **pracy** (pociąg pokonujący opory tarcia) oraz na pokrycie **strat** (ucieczka ciepła z bojlera) wraca do otoczenia. Sama nazwa sugeruje, że energia pracy jest pożytecznie wykorzystywaną energią, np. do przewożenia pasażerów. Energia strat to niepotrzebnie tracona energia, np. na grzanie silników lokomotywy, ciągnącej ten pociąg. Niestety, wszystkie przemiany energii pociągają za sobą straty energii. **Stosunek energii pożytecznej do energii dostarczanej określamy jako sprawność** przemiany i wyrażamy w procentach. Straty wystąpią zawsze, możemy je jedynie minimalizować, np. w mieszkaniu, zwiększając izolację cieplną pomieszczenia, zmniejszamy straty, w bojlerze podobnie zmniejszamy straty, zwiększając grubość izolacji. Czy na poziomie społecznym, przesiadając się z samochodu jeżdżącego na gumowych kołach (duże tarcie), do metra, jeżdżącego po stalowych szynach (małe tarcie). Straty są nieuniknione a nawet konieczne. „Gdzie drwa rąbią tam wióry lecą".

Rozdział II

Obiekt w układzie regulacji

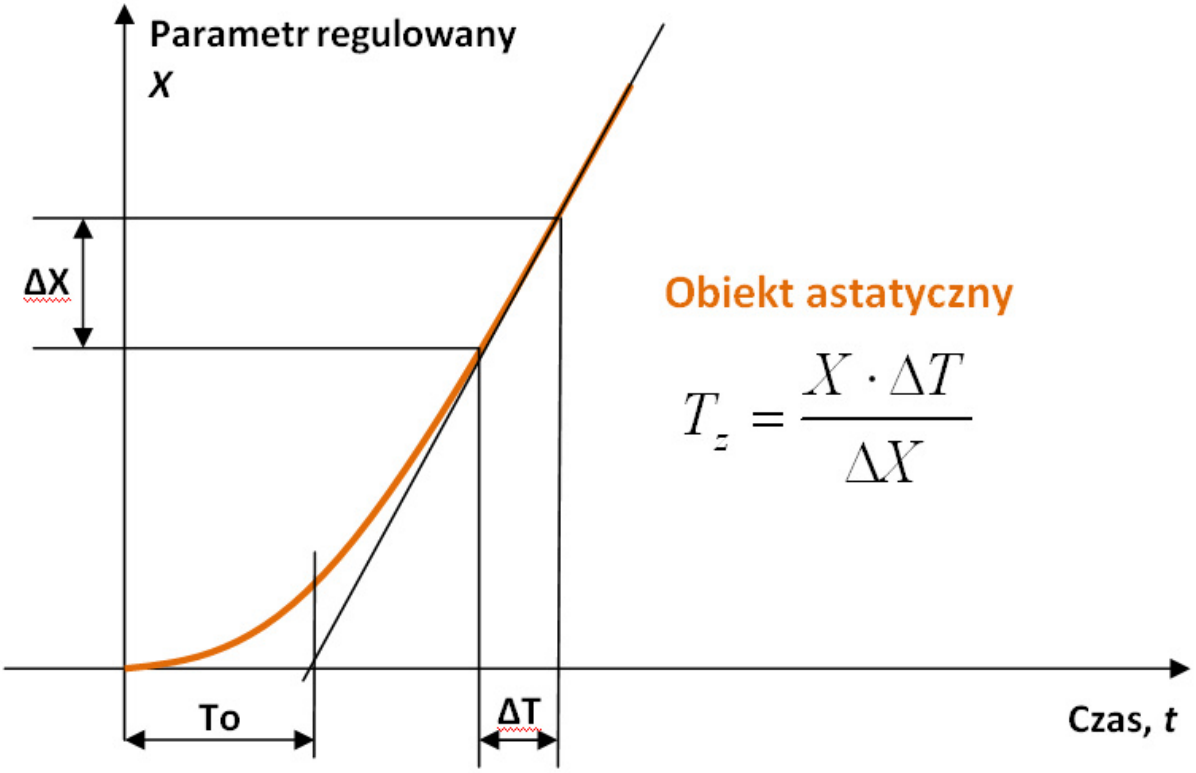
Źródło energii, którym dysponuje układ regulacji, poprzez zawór i efektor zasila obiekt. Kiedy moc efektora jest na tyle niska, że obiekt zużywa całość dostarczonej energii, wtedy układ jest w równowadze, taki zespół efektor - obiekt nazywamy **statycznym**. Jeżeli efektor dysponuje potencjałem nieograniczonym z punktu widzenia zapotrzebowania obiektu na energię, tak, że prędzej dojdzie do zniszczenia obiektu niż do równowagi, taki efektor - obiekt nazywamy **astatycznym**. W ten sposób określamy charakter obiektu.

Myśląc o inercji obiektu, myślimy o zespole efektor – obiekt. Obiekt zasilany jest energią przez efektor, którego zadaniem jest dostosować formę energii, przekształcić ją do postaci, którą skonsumuje obiekt. Efektor posiada określoną moc, czyli zdolność przekazywania energii w czasie, a obiekt określoną inercję, czyli pojemność do magazynowania energii. Przepływ energii do obiektu, odbywa się w czasie. A zatem, żeby nadać nowy stan energetyczny masie obiektu, musimy poczekać. Rozpędzając auto do „setki", musimy poczekać. Im większa moc silnika i mniejsza masa auta, tym szybciej doczekamy się „setki.



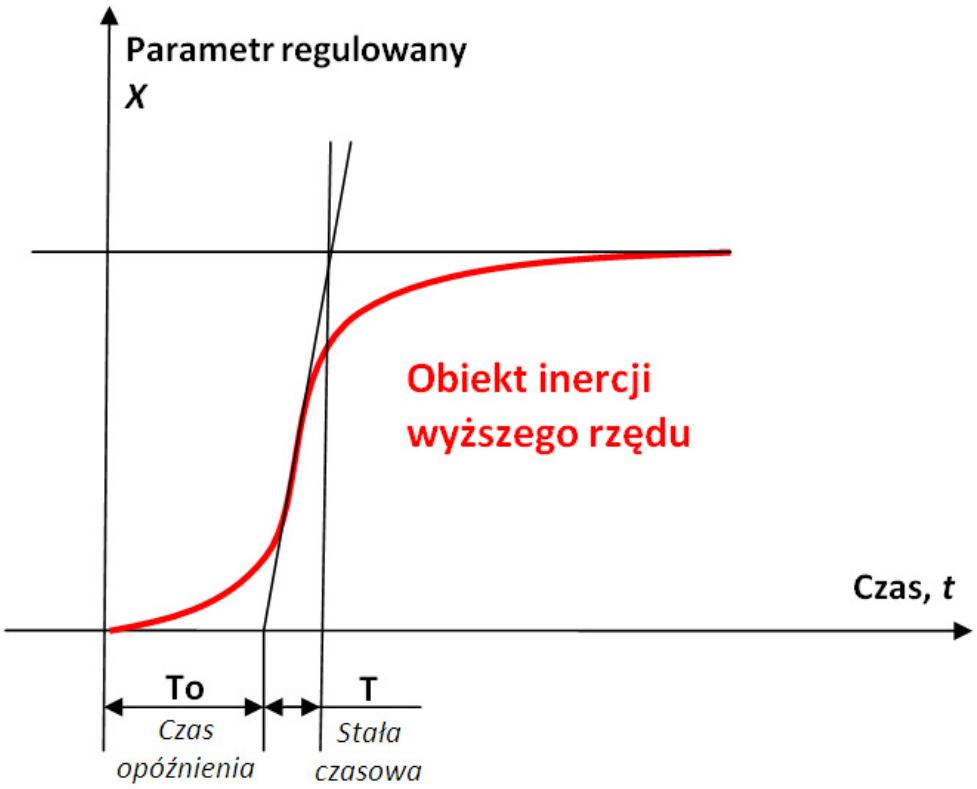
Rysunek przedstawia zapis zmiany ***parametru regulowanego „ω”*** w czasie, dla obiektu pierwszego rzędu. Zmiana parametru powstała poprzez skokowe otwarcie zaworu zasilającego efektor. Taki kształt narastania parametru, reprezentuje obiekty typu pierwszego rzędu inercji. Krzywą możemy zinterpretować w następujący sposób: początek liniowego narostu parametru ”ω” reprezentuje kumulację energii kinetycznej w masie obiektu. Jeżeli parametr „ω” jest prędkością, wtedy jej wzrost zwiększa opory tarcia, czyli zwiększa moc traconą do otoczenia. Po pewnym czasie coraz więcej energii ucieka do otoczenia, rosną straty. Układ dochodzi do równowagi, kiedy cała energia dostarczana do obiektu, jest tracona na pokonanie oporów tarcia. Ustala się stały poziom prędkości, energia kinetyczna się nie zmienia, układ pozostaje w nowej równowadze. Gdybyśmy analizowali osiąganie równowagi w bojlerze do grzania wody, to punkt równowagi wystąpi, gdy energia dostarczana do obiektu zamienia się w energię strat i cała przenika przez izolację do otoczenia. Inercję obiektu określamy parametrem nazywanym ***stałą czasową, T***.

Jak już powiedzieliśmy, jeżeli źródło dysponuje potencjałem nieograniczonym z punktu widzenia zapotrzebowania obiektu na energię, taki obiekt nazywamy astatycznym.



Obiekt astatyczny opisujemy dwoma parametrami: ***czasem opóźnienia, To*** oraz ***stałą czasową zastępczą***, ***Tz***.

Wszystkie elementy materialne, kiedy analizować ich inercję pojedynczo, są **inercjami pierwszego rzędu**. W układzie efektor – obiekt powstaje łańcuch inercji pierwszego rzędu. Im więcej elementów w łańcuchu, tym **wyższy stopień inercji**.



Rysunek przedstawia zmianę parametru obiektu inercji wyższego rzędu. Obiekt określają dwa parametry. Tak jak w obiekcie pierwszego rzędu ***stała czasowa, T*** określa szybkość kumulacji energii, a ***czas opóźnienia, To*** jest czasem, po jakim energia poprzez efektor dotrze do obiektu.

Źródło: Internet

Rozdział III

Zawór i efektor

Zawór

Zawór precyzyjnie odmierza ilość energii dostarczanej do obiektu. Dopasowaniem formy energii i jej przekształceniem zajmuje się efektor. Przekształca energię elektryczną na energię cieplną w grzałce lub na prędkość obrotową w silniku elektrycznym zaś energię chemiczną benzyny przekształca na prędkość obrotową kół samochodu. **Regulator wypracowuje informację, ile energii powinien otrzymać obiekt.** Przelicza ją na ilość mocy, która powinna aktualnie być dostarczana do obiektu. Przelicza ją na wielkość otwarcia zaworu wyrażoną w procentach. Ta wartość jest przekazywana do zaworu. Zawór posiada urządzenie - sterowany siłownik nazywany serwomotorem, nastawiający wielkość jego otwarcia. Serwomotor uchyla zasuwę zaworu, zgodnie z informacją otrzymaną z regulatora. Energia przepływa przez zawór z określoną mocą i zasila efektor, który dopasowuje jej formę do postaci, konsumowanej przez obiekt. Przypomnijmy, że obiekt otrzymaną energię przeznaczy na zmianę stanu własnego, na wykonanie pracy oraz na pokrycie strat. Zawór, którego pracę opisaliśmy, możemy nazwać **liniowym**, ponieważ zachodzi w nim liniowa, proporcjonalna zależność między sygnałem sterującym z regulatora, zawartym między 0% a 100%, a otwarciem zaworu między 0% a 100% jego przepustowości. Zawory liniowe z serwomotorami pracują najczęściej z mediami, takimi jak para wodna, woda, sprężone powietrze, olej hydrauliczny, itp. Ponieważ zawory posiadają urządzenia napędu do przestawiania zasuwy lub grzybka są najdroższymi elementami w układzie regulacji automatycznej.

ZAPAMIETAJ

Od pewnego czasu stosuje się tańsze rozwiązania, w których zawór przyjmuje tylko dwa stany – jest otwarty lub zamknięty. Zamienia stały strumień energii, w **impulsy energii**. Zawór posiada o wiele prostszą budowę i jest o wiele tańszy od liniowego. Zastosowanie takiego zaworu nie powinno wpłynąć na poprawność pracy efektora oraz obiektu. Realizuje się to, dobierając częstotliwości impulsowania energii tak, aby obiekt dzięki swojej inercji odbierał ciąg impulsów jako stały dopływ energii. Duży piec hartowniczy z inercją liczoną w dziesiątki minut nie zauważy impulsowania energii do jego grzałki z częstotliwością 1 Hz. Oczywiście, to nie piec nie zauważy, tylko jego termometry nie zarejestrują zmian temperatury w rytmie impulsów dostarczanych co 1 sekundę. Impulsy dostarczane w stałym

rytmie, żeby zapewnić regulację ilości dostarczanej energii, będą różniły się długością, inaczej czasem trwania. Jeżeli impulsy będą trwały połowę sekundy, to średnia wartość energii dopływającej wyniesie połowę energii dostarczonej przy pełnym otwarciu zaworu tak, jakby zawór liniowy otwarty był na 50%. Przy impulsie trwającym 0,2 sekundy, powiemy, że zawór otwarty jest na 20%. Czyli zmieniając długość impulsu, od zera do jednej sekundy, będziemy zmieniać ilość dostarczanej energii od 0% do 100%.

W przypadku obiektów, o mniejszej inercji, jak np. silniki elektryczne o inercji liczonej w sekundach, częstotliwość impulsowania liczy się w kilohercach. Wtedy jako zawory stosuje się elementy półprzewodnikowe. Podobnie przy oświetleniu pomieszczenia, gdzie zaworem jest ściemniacz, a efektorem żarówka, częstotliwość impulsowania wynosi 100 Hz i takie migające światło odbierane jest przez ludzkie oko jako światło ciągłe. Podobnie rozświetlany jest monitor i telewizor.

W silnikach spalinowych wtryskiwacz dostarcza dawkę paliwa w formie impulsu. Precyzyjnie odmierzona dawka paliwa spalana jest wybuchowo, a na wyjściu efektora otrzymujemy jednostajny ruch obrotowy sprzęgła. Silniki pozycjonowania pojazdów kosmicznych działają na podobnej zasadzie. Rakietowy silniczek generuje serię impulsów, które pojazd o dużej inercji odbiera jako stałą siłę, przesuwającą go na nową pozycję.

ZAPAMIETAJ

Podsumujmy. **Zadaniem zaworu jest dostarczenie precyzyjnie odmierzonej mocy, która zaspokoi potrzeby obiektu, w celu utrzymania jego parametru regulowanego na zadanej wartości.**

Źródło: Internet

Efektor

Kierowca bolidu F1 przypięty pasami przyspiesza, licząc dziesiąte części sekundy, ale już maszynista w lokomotywie przyspieszając, liczy minuty, jako że nie chce poprzewracać pasażerów jadących w pociągu. Rakieta wynosząca ludzi na orbitę ogranicza przyspieszenie ze względu na ich zdrowie. Bojler kąpielowy posiada grzałkę o mocy tylko 1 kW i nagrzewa wodę kilka godzin, bo wiadomo, kąpiel będzie dopiero wieczorem, nie ma się co spieszyć. Wiele innych aspektów ogranicza przyspieszenia obiektu związanych z technologią albo wytrzymałością obiektu. Z jednej strony mamy masę obiektu, która gromadzi energię,

a z drugiej silnik – efektor dostarczający tę energię. Efektor charakteryzuje się szybkością dostarczania energii. Szybkość dostarczania to przepływ energii w czasie zwany **mocą efektora**. W samochodzie do rozpędzania jego masy efektorem jest silnik. Do ładowania akumulatora efektorem jest alternator. Do chłodzenia korpusu silnika efektorem jest chłodnica. Efektor posiada ograniczone zdolności przekazywania energii do obiektu, głównie przez ograniczoną moc maksymalną. Dlatego każda zmiana stanu energetycznego związana będzie z czasem wynikającym z szybkości transportu i przemiany energii.

Przemiana i dostarczanie energii, którą wykonuje efektor odbywa się przez dodatkowe przeszkody. Przykładowo, w czajniku do herbaty grzałka umieszczona jest pod pojemnikiem z wodą. Nagrzewający się przewód grzejny jest izolowany piaskiem szamotowym od rurki, w której się znajduje. Rurka dotyka dna pojemnika. Nad dnem znajduje się woda, którą podgrzewamy. Od załączenia prądu elektrycznego minie jakiś czas zanim energia cieplna dotrze do wody. Ten czas nazywamy **opóźnieniem**.

Źródło: Internet

Przyjrzyjmy się jak, w praktyce domowej i przemysłowej, w układach regulacji dobiera się moc efektora do pojemności energetycznej obiektu.

W domowym bojlerze kąpielowym, którego zadaniem jest podgrzać wodę na wieczorną kąpiel, efektor posiada moc ok. 1 kW na 100 litrów wody. Ale już czajnik elektryczny posiada grzałkę o mocy 1 kW na każdy 1 litr wody. Przy parzeniu herbaty nie możemy zbyt długo czekać na zagotowanie wody. Pić chce się teraz. Czas zagotowania wody to 2 minuty. W mieszkaniu utrzymujemy, w lecie, odpowiednią temperaturę za pomocą klimatyzacji schładzającej pomieszczenie. Efektor klimatyzatora dysponuje mocą cieplną w przeliczeniu 1 kW na około 20 m^3 pomieszczenia. Klimatyzator w samochodzie osobowym schładza o wiele mniejsze nie izolowane pomieszczenie i posiada moc cieplną ok. 1 kW. Natomiast samochód do przewożenia towarów chłodzonych wyposażony jest w urządzenie chłodzące z efektorem o mocy 1 kW na 1000 kg przewożonego ładunku. Chłodnia w samochodzie jest przeznaczona dla podtrzymania temperatury ładunku, nie do jej obniżania. W chłodniach przemysłowych, które mają o wiele grubszą izolację niż samochody chłodnie, na 1 kW mocy efektora przypada 2000 kg masy składowanego towaru. Ale już w chłodni tunelowej, gdzie przygotowuje się owoce do przechowywania, z +18 °C schładza się je do -18°C. Na 1 kW mocy chłodniczej efektora przypada 7 kg truskawek, schładzanych w ciągu godziny.

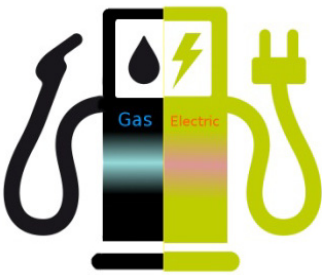
Wróćmy do samochodu osobowego, którego efektor jazdy, czyli silnik, w aucie popularnym posiada moc 1 kW na 30 kg masy, zapewniając „odpowiednią" dynamikę jazdy. Samochód ciężarowy dysponuje mocą silnika na poziomie 1kW na 100 kg masy załadowanego pojazdu. Podobnie jak tramwaj, którego silniki przeznaczają również 1 kW mocy na 100 kg masy. Natomiast pociąg, również jak tramwaj porusza się po szynach, każdy 1 kW mocy silników obsługuje 500 kg masy pociągu. Stąd porusza się o wiele dostojniej niż tramwaj. Jeszcze dostojniej porusza się statek towarowy, którego maszyna napędowa dysponuje mocą w stosunku 1 kW na 1000 kg masy załadowanego statku.

Analizując stosowany w praktyce dobór efektorów do obiektów, możemy zauważyć, że w podobnych urządzeniach w zależności od przeznaczenia występuje duża różnica mocy efektorów w stosunku do masy obiektu. Przykładowo, w podgrzewaczach wody w czajniku i w bojlerze kąpielowym stosujemy tę samą moc efektora 1 kW - w czajniku na 1 litr wody, a w bojlerze na 100 litrów wody. Tak duża różnica wynika z tego, że pić się chce teraz, a kąpiel będzie dopiero wieczorem. Podobnie samochód osobowy posiada efektor o mocy 60 kW, a samochód wyścigowy o moc 360 kW przy takiej samej masie. Samochód wyścigowy zbudowany jest do jazdy bardziej dynamicznej i z większymi prędkościami.

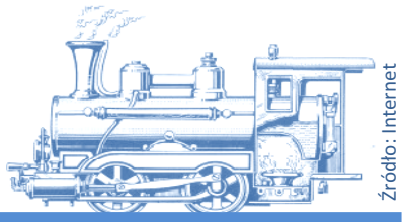
Odzysk energii

Źródło: Internet

Ze zbiornika energii poprzez zawór dostarczamy energię do efektora, który przekształca ją i zasila obiekt. Zwiększanie energii obiektu zwiększa wartość jego parametru regulacji. Kiedy chcemy zmniejszyć wartość parametru, musimy odebrać obiektowi energię. Przez efektor i zawór energia wraca do zbiornika. W przypadku obiektów z efektorem w postaci silnika elektrycznego rozwiązania techniczne są proste. Odbieranie energii kinetycznej pojazdowi takiemu jak samochód elektryczny, tramwaj lub lokomotywa polega na przejściu silnika napędowego w pracę prądnicową i przepływie energii elektrycznej przez zawór zasilający z powrotem do zbiornika energii, czyli trakcji zasilającej. Podobnie w walcarkach, windach i innych obiektach o dużej masie, w których występuje częste hamowanie. Inaczej rozwiązano hamowanie z odzyskiem energii w pojazdach napędzanych silnikami spalinowymi, nazywanymi hybrydowymi. Przy napędzie spalinowym jeszcze nie potrafimy przy hamowaniu odzyskiwać paliwa. Pojazd posiada dwa silniki, główny spalinowy i pomocniczy elektryczny. W czasie hamowania silnik elektryczny pracuje jako prądnica i przez zawór tłoczy energię elektryczną do akumulatora. Energia tak odzyskana i zgromadzona w akumulatorze wykorzystywana jest do rozpędzania samochodu, kiedy pracują obydwa silniki. Pompy ciepła i klimatyzatory w zimie grzeją pomieszczenia, pobierając energię z otoczenia. W lecie odwracają obieg, chłodząc je odbierają energię cieplną z pomieszczeń i rozpraszają w otoczeniu.



Źródło: Internet



Źródło: Internet

Rozdział IV

Przypadek: Lokomotywa

Wiele maszyn wykorzystuje dostarczaną do nich energię w postaci momentu obrotowego lub siły posuwu. Źródłem energii w tej postaci są silniki. Silnik jest przetwornikiem energii jednej postaci, np. oleju napędowego, energii elektrycznej, pary wodnej, sprężonego powietrza, na inną postać energii kinetycznej. Silnik, efektor lokomotywy, obraca kołami i pociąg przemieszcza się „z miejscowości A do miejscowości B". Silnik, efektor sprężarki, nadaje prędkość obrotową wałowi, a wał przez korbowody przesuwa tłoki wykonujące pracę sprężania. Jeden silnik tokarki obraca obrabiany przedmiot, a drugi silnik przesuwa nóż skrawający. Dokonuje się proces obróbki. Żeby procesy, w których energia przemieniana jest w pracę, realizowane były z określonym skutkiem i z zachowaniem bezpieczeństwa, nie mogą przebiegać żywiołowo, muszą być sterowane. Do sterowania procesami pracy wykonywanej przez silniki wykorzystujemy parametry ruchu: prędkość, moment, przyspieszenie, moc. **Moc jest wartością przetwarzanej energii sprowadzonej do danej chwili. Energia przetwarzana „teraz" jest mocą**, jak we wzorze: Moc jest równa energii podzielonej przez czas, której jednostką jest kilodżul na sekundę lub kilowat.

ZAPAMIETAJ

Rozpatrzmy przykład sterowania wyżej wspomnianą lokomotywą, która jedzie między stacjami A i B. Raz jedzie solo, a raz ciągnąc zestaw wagonów o masie 2000 ton. Załóżmy, że prędkość przejazdu ma być taka sama. Lokomotywa posiada silniki prądu stałego, w których jak zapewne pamiętamy, prędkość obrotowa zależy od wielkości przyłożonego napięcia, a moment obrotowy od ilości prądu przepływającego przez silnik. Sterowanie prędkością wydaje się proste – prędkość będzie taka, jakie podamy na silniki odpowiadające jej napięcie. Natomiast ilość prądu, czyli wielkość momentu potrzebna do napędu lokomotywy o masie 20 ton i dla napędu zestawu o masie 2000 ton dla pokonania tarcia będzie 100 razy większa. Moc dostarczana do lokomotywy będzie również sto razy większa przy jeździe w zestawie z wagonami. Wytracona zostanie na tarcie występujące między kołami i szynami i jako ciepło rozpraszane do otoczenia. A jeżeli pociąg będzie wjeżdżał na wzniesienie, moc zużyje się na podniesienie jego energii potencjalnej. Jest jeszcze jedna postać energii, którą pociąg wykorzysta na rozpędzanie, a która będzie magazynowana w masie pociągu w postaci energii kinetycznej. Tę energię będziemy odzyskiwali w chwili hamowania pociągu oddając ją do sieci zasilającej trakcję. Gdyby nie straty związane z dostarczaniem z trakcji i odzyskiwaniem

tej energii do trakcji moglibyśmy powiedzieć, że przyspieszanie odbywa się za darmo. Tyle energii ile pobierze lokomotywa do rozpędzania odda przy hamowaniu.

Podsumujmy. Sterujemy parametrami energii elektrycznej: wysokością napięcia i ilością prądu, aby sterować parametrami jazdy pociągu prędkością i uciągiem. Lokomotywa pobiera energię elektryczną, którą rozprasza na tarcie oraz zamienia na energię kinetyczną i potencjalną masy pociągu. Z punktu widzenia wagonów pociąg potrzebuje lokomotywy, żeby przy założonych parametrach podróży: prędkości i uciągu pokryć zapotrzebowanie na energię do pokonania tarcia oraz na energię kinetyczną i potencjalną.

Źródło: Internet

Gdybyśmy chcieli oszacować moc silników lokomotywy, efektorów pociągu, powinniśmy odnieść energię, której potrzebuje pociąg do czasu w jakim lokomotywa powinna jej dostarczyć. Nie znając siły tarcia, możemy policzyć moc silnika dla rozpędzania do prędkości 100 km/godz.

PRZYKŁAD

Masa, ***m*** = 2000 000 kg

Prędkość, ***v*** = 100 km/h = 36 m/s

Zakładamy **czas rozpędzania**, ***t*** = 10 minut = 600 s

Energia kinetyczna $= m \times v^2 / 2$ = 2 000 000 × 1296/2 = 1296 × 10\6 [J] = 1,2 [GJ]

Moc = ***energia kinetyczna / czas*** = 1296 / 600 = 2,16 [MW]

Z takim silnikiem, po 10 minutach rozpędzania, mkniemy naszym pociągiem o masie 2 000 ton z zawrotną prędkością 100 km/h.

Ile mocy potrzeba by dodatkowo, gdyby rozpędzanie pociągu odbywało się pod górkę na stoku o wysokości 100 metrów?

PRZYKŁAD

Wysokość, h = 100m

Energia potencjalna, $E_p = m \times g \times h$ = 2000000 x 9,81 x 100 = 200 [MJ]

Moc = E_p / t = 200 / 600 = 0,33 [MW]

Silnik powinien dysponować mocą 2,46 [MW]. (plus moc na pokonanie tarcia).

Energia kinetyczna i potencjalna zmagazynowana w masie pociągu 1,5 [GJ] zostanie odzyskana przy hamowaniu i powrocie do stacji z której wyruszyliśmy.

Źródło: Internet

Rozdział V

Ćwiczenie praktyczne - energie

Starczy już teorii. To co się dzieje z pociągiem o wadze 2000 ton, przemiany energii i parametrów jest trudno wyobrażalną teorią, którą trudno przełożyć na nasze zmysłowe pojmowanie świata. Koniec z myśleniem, zróbmy coś praktyczne. Spróbujmy swoimi zmysłami poczuć różne postaci energii i ich przemiany. Zamiast pociągu użyjemy roweru. Silnikiem efektorem będą nasze nogi, a zmęczenie i wysiłek będą reprezentowały ilość wydatkowanej energii.

Przygotowania:

Weź rower swój, albo pożyczony. Rower powinien mieć wskaźnik prędkości i pompkę.

ĆWICZENIE

Ćwiczenie 1.

Doświadczenie energii potrzebnej do pokonania oporów tarcia opon o jezdnię.

Znajdź odcinek drogi płaskiej ok. 1 km, bez wiatru. Wykonaj następujące czynności:

1. napompuj opony do ciśnienia 1 bara,
2. przejedź po drodze z prędkością 15 km/h,
3. napompuj opony do maksymalnego ciśnienia,
4. przejedź ten sam odcinek drogi.

Zanotuj w skali 1 do 10 wysiłek wydatkowany na jazdę z dużym tarciem przy ciśnieniu w oponach 1 bar i małym tarciem przy maksymalnym ciśnieniu. To trochę tak, jak jazda samą lokomotywą lub z wagonami.

Ćwiczenie 1A.

ĆWICZENIE

Doświadczenie energii potrzebnej do pokonania oporów tarcia aerodynamicznego czyli o powietrze.

Na tym samym odcinku drogi, z napompowanymi na maksa oponami rozpędzaj powoli rower do prędkości maksymalnej i przejedź do końca drogi.

Zanotuj prędkość maksymalną. Zanotuj wysiłek jazdy z prędkością maksymalna, zapewne będzie to 10.

Źródło: Internet

Ćwiczenie 2.

ĆWICZENIE

Doświadczenie energii potrzebnej do zwiększenia energii potencjalnej rowerzysty z rowerem.

Znajdź pochyły odcinek drogi.

Opony napompuj na maksa. Wjedź na to wzniesienie z prędkością ok. 12 km/h.

Zanotuj w skali 1 do 10 wysiłek przy pokonywaniu wzniesienia. Zanotuj czas jazdy i długość przejechanej drogi.

Jeżeli nie znasz nachylenia drogi oblicz ją sam według metody:

- weź poziomicę o długości 1 m i miarkę zwijaną.
- poziomicę połóż na drodze, następnie unieś jej koniec do poziomu.
- zmierz wysokość na jaką uniosłeś koniec.

Teraz wiesz o ile centymetrów na każdym metrze przejechanym unosiłeś się wraz z rowerem.

Pomnóż tą wartość przez długość przejechanego odcinka i podstaw do wzoru na energię potencjalną. $E_p = m \times g \times h$ [kJ]

Obliczoną energię podziel przez czas wjazdu. Otrzymasz moc. $E_p / t = P$ [kW]

Otrzymaną moc nanosimy na skalę ocen wysiłku. Wysiłek w tym ćwiczeniu mamy opisany w skali odczuć i w skali mocy w watach.

Wyliczyłeś moc swojego efektora. Jeżeli chcesz przeliczyć ją na konie mechaniczne to 1 [kW] = 1,37 [Km]

Źródło: Internet

ĆWICZENIE

Ćwiczenie 3.

Doświadczenie energii potrzebnej do zwiększenia energii kinetycznej zespołu, czyli pokonanie bezwładności , inercji.

Wracamy na płaski odcinek drogi z oponami napompowanymi na maksa.

Kilka razy rozpędzamy się jak najszybciej do prędkości ok. 20 km/h.

Notujemy najlepszy czyli najkrótszy czas. Notujemy wysiłek przy rozpędzaniu roweru w skali 1 do 10.

Obliczamy energię kinetyczną ze wzoru $E_k = m \times v^2 / 2$

Masę bierzemy z ćwiczenia 2, prędkość końcową rozpędzania przyjęliśmy 20 km/h, przeliczamy ją na m/s.

Obliczoną energię dzielimy przez czas rozpędzania. Otrzymaną moc w watach nanosimy na skalę wysiłku.

Mamy już dwa opisane punkty wysiłku wyrażone w jednostkach mocy oraz w jednostkach wysiłku. Wracamy do ćwiczenia 1. Punkty wysiłku pokonywania tarcia odnosimy do naniesionych już punktów i szacujemy ich wartość mocy. Następnie wracamy do ćwiczenia 1A i podobnie szacujemy wartość mocy maksymalnego wysiłku jazdy na rowerze.

Koniec ćwiczenia – odpoczywamy. Oddajemy rower jeżeli nie nasz.

Ćwiczenie wykonaliśmy, żeby z abstrakcji pojęć fizyki zejść na „ziemię” i żebyśmy mogli „dotknąć”, odczuć różne formy energii i ich przemiany. Opanowanie pojęć opisujących energie i poczucie tych przemian na sobie zmysłami i wysiłkiem, powinno pomóc zrozumieć sposoby sterowania energią i jej przemianami.

Podsumowując. Doświadczyliśmy energii potrzebnej do pokonania inercji bezwładności przy rozpędzaniu roweru. Doświadczyliśmy też energii, zużywanej do pokonania sił oporu tarcia. Nasz efektor również doświadczył wjazdu na wzniesienie, kiedy to rower nabierał wysokości, kumulując energię potencjalną.

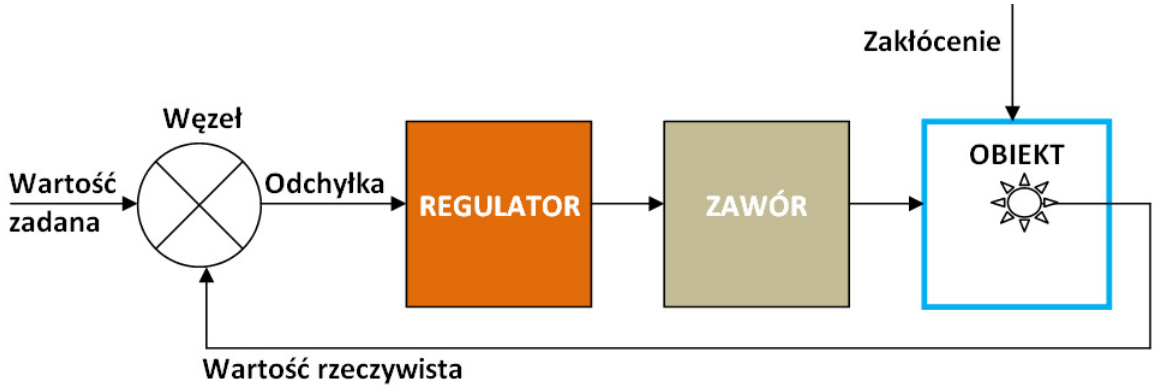
CZĘŚĆ II

Model sygnałów sterujących

Rozdział I

Model sygnałów sterujących

Możemy spojrzeć na układ sterowania z jeszcze innej strony. Przyjmiemy jako podstawę analizy obieg informacji, czyli obieg sygnałów sterujących w **układzie regulacji automatycznej**.



Najważniejszym sygnałem układu regulacji będzie żądana wartość parametru obiektu, którą nazywamy **wartością zadaną**. Jest ona przesyłana do układu przez jednostkę nadrzędną, którą może być operator - człowiek lub sterownik - komputer. Wartość zadana jest celem działania układu. Pierwszą operacją wykonywaną w układzie jest porównanie wartości zadanej z **wartością rzeczywistą** parametru regulowanego. Operację tę realizuje **węzeł sumacyjny**. Porównuje wartość zadaną z ujemną wartością rzeczywistą parametru. Stąd nazwa **ujemne sprzężenie zwrotne**. Powstająca na wyjściu węzła **odchyłka** reprezentuje niezgodność między rzeczywistą, a żądaną wartością parametru. Jej **znak** wskazuje, czy wartość rzeczywista jest większa czy mniejsza od zadanej. Oczywiście, jeżeli wartość odchyłki wynosi zero, układ jest w stanie równowagi. Można powiedzieć, układ regulacji „śpi". Sen układu regulacji może być zakłócony przez zmianę wartości zadanej parametru, bądź **zakłócenie**, które zmieni stan energetyczny obiektu, zmieniając wartość rzeczywistą parametru. Pojawia się różnica w węźle sumującym, pojawi się odchyłka. Trzy parametry odchyłki jej **wartość, szybkość narastania i znak** przekazane zostaną do regulatora. Algorytm pracy regulatora oparty jest na porównaniu trzech parametrów opisujących obiekt, które wcześniej opisaliśmy, z trzema parametrami odchyłki. Regulator na podstawie algorytmu obliczy wielkość sygnału sterującego **zaworem**. Wyliczony sygnał sterujący, wyrażony w procentach otwarcia zaworu, trafia do urządzenia ustawiającego otwarcie

zaworu. Zawór uchyla zasuwę i strumień energii zasila obiekt. Energia dostarczana zmienia stan obiektu, zmieniając przy tym wartość rzeczywistą parametru regulacji. Wartość parametru podąża w kierunku wartości zadanej i po pewnym czasie zrównują się obydwie wartości. Odchyłka zmniejsza się do zera, układ zasypia.

Przykładowy układ regulacji automatycznej

Chcąc zobaczyć, co kryje się pod pojęciem **układ regulacji**, z jakich elementów się składa, na czym polega jego działanie, przeanalizujmy sposób ogrzewania pokoju w mieszkaniu.

Źródło: Internet

Najpowszechniejszy obecnie sposób ogrzewania realizuje kaloryfer z zaworem termostatycznym. Pokój będziemy nazywali **obiektem regulacji**. Mieszkaniec zapewne chciałby, żeby w pokoju było przyjemnie ciepło. Trudno zdefiniować pojęcie „przyjemnie", ale możemy zaryzykować zakres temperatur między 18 a 23 stopniami Celsjusza. Na pokrętle zaworu termostatycznego są zaznaczone kropkami lub kreskami temperatury z tego zakresu. Wartość temperatury, którą wybierzemy, nastawiając pokrętło, w automatyce nazywamy **wartością zadaną**. Chcę, żeby w pokoju było 20 stopni, ustawiam odpowiednio pokrętło. Od teraz układ regulacji będzie robił wszystko, co w jego mocy, aby w pokoju, obiekcie regulacji, było zawsze 20 stopni Celsjusza. Wyjaśnijmy, że nazwa zawór termostatyczny jest nazwą handlową. W jego skład wchodzi kilka elementów układu regulacji. Pokrętło, którego funkcję już poznaliśmy, służy do nastawiania wartości zadanej w układzie regulacji. Następnym elementem jest **regulator**, który wykonuje zadanie porównania wartości zadanej z **wartością rzeczywistą** temperatury w pokoju - obiekcie. Pokrętło posiada otwory, w które wnika powietrze z otoczenia i jest tam mierzona jego temperatura. Wartość rzeczywista temperatury jest porównywana z wartością zadaną, a różnicę tych temperatur nazywamy **uchybem regulacji**.

Jeżeli w regulatorze powstanie uchyb regulacji, zostanie otwarty zawór dolotowy gorącej wody do kaloryfera. Im większy uchyb tym bardziej otworzy się zawór, zwany w automatyce **zaworem zadającym**. Im zimniej w pokoju, tym zawór zostanie bardziej otwarty. Tym więcej gorącej wody dopłynie do kaloryfera. Kaloryfer będzie cieplejszy i szybciej nagrzeje pokój. Kaloryfer (łac. *calor* – ciepło , *fero* – nieść) dostarcza ciepło do pomieszczenia, pełniąc funkcję **efektora**. Powietrze, ale też sprzęty, meble, ściany nagrzewają się. Temperatura w pokoju rośnie. Po jakimś czasie, zależnym od kubatury pokoju i od mocy grzejnika, temperatura wzrośnie i zbliży się do temperatury zadanej. Uchyb zmaleje. Regulator przymknie zawór.

Temperatura przestanie wzrastać. Ustali się równowaga pomiędzy ilością dostarczanego ciepła przez kaloryfer, a stratami ciepła uciekającego przez ściany, okna, wentylację. Układ regulacji osiągnie **stan równowagi**.

Źródło: Internet

Rozpatrzmy taki przypadek. Układ regulacji znajduje się w stanie równowagi. Otwierają się drzwi i do pokoju ktoś wchodzi, wciągając za sobą masę nieogrzanego powietrza. Temperatura gwałtownie się zmienia, wytrącając układ regulacji z równowagi. Takie zdarzenie nazywamy **zakłóceniem**. Gwałtownie zwiększy się uchyb regulacji i regulator według opisanego wcześniej sposobu działania doprowadzi układ do równowagi.

Albo taki przypadek. Gdyby jakimś cudem temperatura rzeczywista zrównała się z wartością zadaną, to uchyb równałby się zero. Regulator zamknąłby zawór gorącej wody. Efektor - kaloryfer przestałby dostarczać energii cieplnej do podtrzymania temperatury w pokoju. Temperatura w pokoju zaczęłaby spadać . Pojawi się uchyb regulacji i regulator uchyli zawór gorącej wody. Układ regulacji po pewnym czasie wróci do stanu równowagi. Zatem w stanie równowagi wartość rzeczywista jest „odrobinę" mniejsza od wartości zadanej, tak aby uchyb regulacji otworzył zawór na tyle, żeby wyrównać straty ciepła z pokoju.

Kaloryfer dostarcza energię cieplną, która z jednej strony uchodzi na zewnątrz w postaci strat, a z drugiej strony kumuluje się w sprzętach i ścianach pokoju. Stół, szafa, krzesło, kubek z herbatą również stają się cieplejsze. Magazynuje się w nich ciepło, które odzyskujemy całkowicie, kiedy w pokoju spada temperatura. Nie zaliczamy tego ciepła do strat.

Rozdział II

Regulator

Najważniejszym elementem sterowania jest **regulator**. Regulator na podstawie pomiarów parametru regulowanego obiektu, swoistej diagnozy jego stanu, ordynuje dawkę energii lub stosowną moc, która powinna utrzymać parametr w jego żądanej wartości. Jest zatem jakaś nadrzędna jednostka, (człowiek lub komputer), która domaga się od regulatora utrzymania parametru (np. temperatury, ciśnienia, napięcia, prędkości, itp.) na zadanym poziomie.

Źródło: Internet

Uchyb regulacji

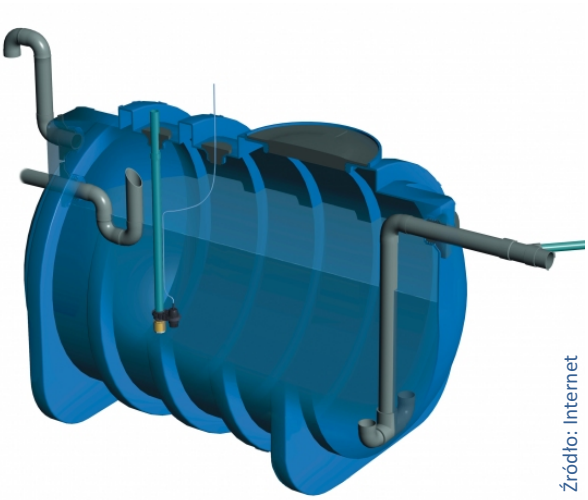
Regulator przyjmuje do wiadomości, jaką wartość powinien zachować parametr regulowany, następnie porównuje go z wartością zmierzoną tego parametru w obiekcie. Wynik tego porównania nazywamy **uchybem regulacji**. Charakteryzują go trzy cechy. **Znak uchybu +/-** informuje czy parametr obiektu wzrósł czy zmalał w stosunku do wartości zadanej. Drugi element to **wartość uchybu** informująca o ile jednostek miary parametr regulowany odchylił się od zadanej. I trzecia zawarta w nim informacja to **szybkość**, z jaką narasta uchyb. Te trzy informacje zawarte w uchybie stanowią diagnozę bieżącej sytuacji obiektu. **Jeżeli wartość uchybu wynosi zero, regulator nic nie robi – śpi. Jeżeli nie jest to zero, regulator przystępuje do działania**.

ZAPAMIETAJ

Właściwości obiektu

Aby regulator zaordynował jakąś terapię, musi najpierw wiedzieć, jak zareaguje obiekt na potraktowanie go dawką energii. Czyli, wcześniej jeszcze, w ramach przygotowania do pracy, regulator powinien mieć zapisane w pamięci statyczne i dynamiczne właściwości obiektu.

Właściwość statyczna obiektu opisuje – jak zmieni się parametr sterowany obiektu pod wpływem zmiany ilości energii dostarczanej do obiektu. Nazywamy go **wzmocnieniem obiektu** i definiujemy jak w technice, jako stosunek wielkości wyjściowej do wejściowej. Wyjście z obiektu to wartość parametru np. temperatura w °C, a wejście to otwarcie zaworu dozującego energię wyrażoną w procentach otwarcia. Wymiarem wzmocnienia obiektu będzie np. °C / % (stopień Celsjusza na procent otwarcia zaworu).



Źródło: Internet

Właściwości dynamiczne obiektu opisują, jak zareaguje obiekt na dawkę energii, jak parametr regulowany obiektu będzie zmieniał się w czasie. Jak szybko będzie narastał parametr regulowany, jeżeli do obiektu dostarczymy dawkę energii.

Źródło: Internet

Dla **obiektu statycznego** właściwość tę nazywamy **stałą czasową obiektu** i wynika ona z kumulacji energii przez materię obiektu. Druga właściwość dynamiczna związana jest ze współpracą efektora z masą materii obiektu. Regulator otwiera zawór i energia dopływa do efektora i dalej płynie, płynie, aż dopłynie do masy obiektu. Czas przepływu energii od zaworu przez efektor do masy obiektu, związany z jej transportem, nazywamy **czasem opóźnienia**. Po czasie opóźnienia zacznie narastać wartość parametru regulowanego wynikająca z szybkości kumulacji energii.

Dla *obiektu astatycznego* określamy *czas opóźnienia* jak dla obiektu statycznego oraz *stałą czasową zastępczą Tz* – jako przyrost parametru regulowanego w czasie.

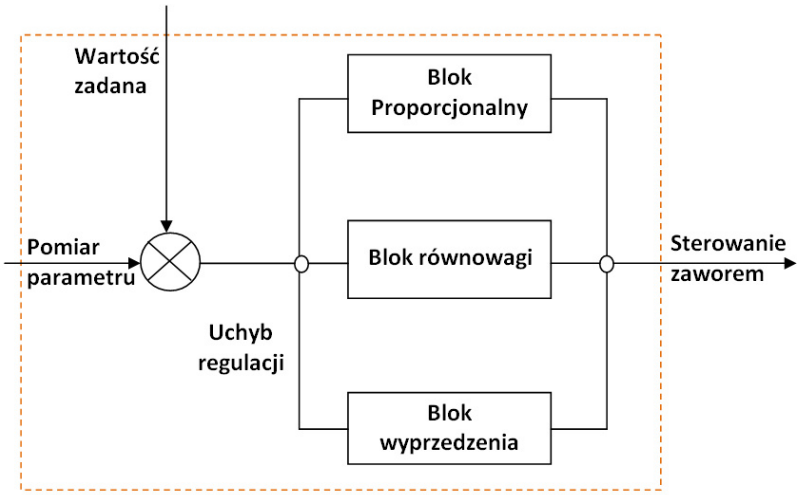
Znając właściwości obiektu i informacje zawarte w uchybie, regulator wypracowuje sposób działania. Do tej pracy posiada trzy wyspecjalizowane bloki.

Blok proporcjonalny przyjmuje informację o znaku i wartości uchybu, a następnie przemnaża ją przez swój **współczynnik proporcjonalności**. Wynik działania przesyła do zaworu zadającego energię do obiektu. Możemy powiedzieć, że proporcjonalnie do wielkości uchybu i znaku otwiera zawór.

Zadaniem drugiego bloku jest zrównoważenie ilości energii, wypływającej z obiektu w formie pracy i strat, z energią dopływającą do obiektu poprzez zawór i efektor. W czasie pracy obiektu zawsze występuje przepływ energii, choćby tylko na pokrycie strat, dlatego zawór dozujący energię zawsze będzie uchylony. **Blok równowagi** reaguje na znak uchybu i jego wartość. Żeby ustalić, jak bardzo zawór ma być uchylony, blok równowagi „powoli" zwiększa lub zmniejsza otwarcie zaworu, z prędkości a wynikającą z przemnożenia uchybu przez swój współczynnik ***Ti***, zwany **czasem zdwojenia**. Działa tak do czasu, aż uchyb zmaleje do zera. Otwarcie zaworu przestaje się zmieniać i takie jak jest pozostanie do następnego pojawienia się uchybu. Blok zasypia. Zawór pozostaje uchylony. Energia przepływa, zachowując stan równowagi. Działanie bloku równowagi - „powolne" zmienianie otwarcia zaworu jest analogiczne do działania układów całkujących, stąd inna nazwa - **człon całkujący**.

Rysunek: *Budowa i funkcje regulatora proporcjonalno-całkująco-różniczkującego, PID*.

Źródło: Internet



Trzeci blok regulatora związany jest z działaniem wyprzedzającym. Mierząc szybkość narastania uchybu, **blok wyprzedzenia** wnioskuje, do jak dużego uchybu może dojść. Im większa prędkość, tym spodziewany większy uchyb. Przekłada szybkość narastania na spodziewaną jego wielkość i, nie czekając, aż uchyb narośnie, aplikuje swoją terapię. Otwiera zawór na pełne otwarcie na czas wynikający z przemnożenia swojego współczynnika ***Td***, zwanego **czasem wyprzedzenia**, przez prędkość narostu uchybu. Akcja bloku trwa krótką chwilę, w czasie powstawania uchybu, i się kończy. Działanie bloku wyprzedzającego oparte jest na pomiarze prędkości, czyli zamianie pochodnej zmiany na długość impulsu, stąd inna nazwa **człon różniczkujący**.

ZAPAMIETAJ

Wszystkie trzy człony regulatora PID działają niezależnie, a wielkości na ich wyjściach sumują się, oddziałując na jeden zawór dozujący energię do obiektu.

Opis budowy i działania regulatora, który tu zamieściliśmy, jest opisem pełnego regulatora PID. W praktyce w zależności od charakteru i wartości parametrów obiektu nie zawsze używamy wszystkich trzech bloków regulatora.

Obecnie mamy dwa **sposoby ustalania nastaw regulatora**. Przypomnijmy, regulator składa się z trzech bloków: proporcjonalnego, wyprzedzenia i równowagi. Aktywność każdego z tych bloków zależy od wartości ich współczynników.

Źródło: Internet

Pierwsza metoda polega na ustaleniu, na podstawie tabel, które bloki mają być załączone do pracy, a następnie na wprowadzeniu do wzorów charakteru i właściwości obiektu oraz uwzględnieniu kryteriów jakości regulacji. Po wykonaniu obliczeń, ręcznie wprowadzamy je do pamięci regulatora.

Druga metoda polega na samoczynnym ustaleniu parametrów przez regulator. Wystarczy z menu regulatora wybrać funkcję AUTOTUNING i poczekać chwilę, aż regulator sam dokona pomiarów charakteru i właściwości obiektu i ustali nastawy własne współczynnika proporcjonalności, czasu zdwojenia i czasu wyprzedzenia.

Regulatory bardziej zaawansowane technicznie posiadają dodatkowo funkcję dostrojenia. Gdy np. w zbiorniku podgrzewamy płyn o masie od 10 do 100 kg w zależności od potrzeb technologicznych, regulator mierzy parametry regulacji i wraz ze zmianą masy obiektu, zmienia swoje parametry.

Przeanalizujmy działanie regulatora.

PRZYKŁAD

Sytuacja wyjściowa 1 - **układ regulacji w równowadze. Uchyb równy zero.**

Blok wyprzedzenia śpi – jego wyjście równe zero. Blok proporcjonalny śpi – jego wyjście równe zero. Blok równowagi śpi – jego wyjście podaje do zaworu poziom otwarcia zapamiętany z poprzedniego ustalenia równowagi.

W wyniku zakłócenia równowagi pojawia się uchyb. Pierwszy do akcji rusza blok wyprzedzający. Przelicza prędkość narostu uchybu. Aplikuje pełne otwarcie zaworu na obliczony czas. Następnie wyłącza się. Teraz do akcji wkracza blok proporcjonalny, otwierając zawór proporcjonalnie do wartości uchybu. W tym samym czasie rozpoczyna swoje działanie blok równowagi. Jak długo występuje uchyb, tak długo koryguje, zwiększa otwarcie zaworu w kierunku przywrócenia wartości zadanej parametru regulowanego. Uchyb zanika. Blok proporcjonalny wyłącza się. Blok równowagi wyłącza się, pozostając z ostatnią nastawą otwarcia zaworu. Układ znowu znajduje się w równowadze.

PRZYKŁAD

Sytuacja wyjściowa 2 - **układ regulacji w stanie spoczynku. Załączamy regulator do pracy.**

Nastawiamy wartość zadaną parametru. Człon wyprzedzenia i człon proporcjonalny, każdy z nich niezależnie, otwierają zawór zasilający efektora na 100%. Efektor dostarcza energię do obiektu. Po chwili, parametr regulowany rośnie. Pierwszy wyłącza się blok wyprzedzenia. Zawór jest otwarty nadal przez blok proporcjonalny. Blok równowagi zwiększa otwarcie zaworu. Po jakimś czasie, wielkość parametru narośnie do takiej wartości, że zacznie maleć uchyb. Blok proporcjonalny z malejącym uchybem będzie zmniejszał otwarcie zaworu. Blok równowagi nadal będzie zwiększał otwarcie zaworu. Powtórzmy, w tym momencie, blok proporcjonalny zamyka zawór, a blok równowagi otwiera go bardziej. Przypomnijmy, suma tych oddziaływań stanowi o wielkości otwarcia zaworu. Kiedy uchyb dojdzie do zera blok proporcjonalny zakończy swoje działanie. Otwarcie zaworu zależeć będzie jedynie od bloku równowagi. Układ regulacji znajdzie się w stanie równowagi.

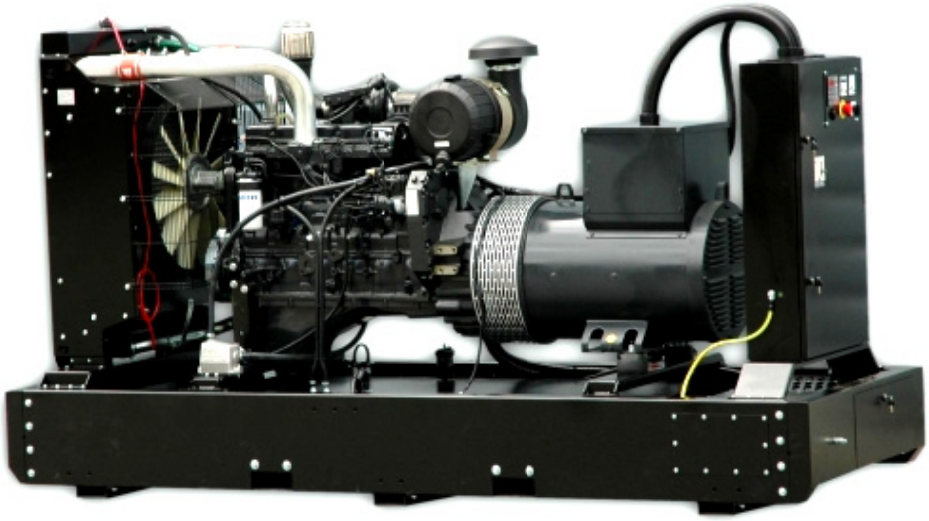
Bywa też, że układ nie zatrzyma się w stanie równowagi i nastąpi przeregulowanie. Parametr regulacji będzie nadal narastał i przekroczy wartość zadaną. Pojawi się uchyb ze znakiem przeciwnym. Blok proporcjonalny zacznie przymykać zawór. Również człon równowagi zacznie go przymykać. Po jakimś czasie parametr zacznie wracać od „góry” do wartości zadanej. Kiedy uchyb spadnie do zera blok proporcjonalny wyłączy swoje działanie. Zawór zostanie przymknięty po akcji bloku równowagi. Układ pozostanie w równowadze. Chyba że znowu układ przesteruje się. Ale to już znamy.

Przypadek: **Prądnica prądu przemiennego.**

Produktem pracy prądnicy prądu przemiennego jest energia elektryczna w formie napięcia i prądu elektrycznego. Moc elektryczna $P = U \times I \times cos\varphi$. Energia elektryczna to moc płynąca przez jakiś czas, $E = P \times t$.

Zadaniem prądnicy jest wyprodukować napięcie o kształcie sinusoidalnym charakteryzujące się dwoma parametrami; wartością amplitudy napięcia i częstotliwością przebiegu.

Kształt sinusoidalny wynika z budowy prądnicy. Wartością amplitudy steruje regulator napięcia, dozując prąd wzbudzenia prądnicy. Wartością częstotliwości przebiegu – regulator obrotów silnika napędzającego prądnicę.



Źródło: Internet

Prądnica, napędzana przez silnik spalinowy, otrzymuje od niego moc mechaniczną $P = M \times \omega$ zwaną mocą czynną. Wirnik również zasilany jest mocą elektryczną wytwarzającą strumień magnetyczny. „Suma" tych dwóch mocy to moc elektryczna oddawana przez prądnicę.

Jeżeli obciążymy prądnicę mocą elektryczną, zwiększy się prąd płynący przez uzwojenia, czego skutkiem będzie spadek napięcia oraz spadek częstotliwości. Regulatory, niezależnie od siebie, zwiększą prąd magnesowania i dawkę paliwa do silnika. Regulator obrotów silnika zwiększając dawkę paliwa, zwiększa moment obrotowy (M) silnika, co zwiększy obroty (ω), a co za tym idzie częstotliwość. Regulator napięcia zwiększając prąd magnesowania (I), zwiększa strumień magnetyczny (φ), co zwiększa amplitudę napięcia. Parametry napięcia wracają do wartości zadanej.

Rozdział III

Parametry regulowane

W układzie regulacji obiekt gromadzi i przetwarza różnego rodzaju energie. Stany energetyczne obiektu opisujemy za pomocą parametrów reprezentujących te stany. Regulacja wartości parametru polega na takim oddziaływaniu energią przez efektor, aby uzyskać konkretną wartość parametru. Jeżeli parametrem regulowanym jest skalar, sytuacja jest dosyć prosta. Takie parametry jak: temperatura, ciśnienie, lepkość, napięcie, wymagają jedynie dostarczania pewnej ilości energii. Wystarczy zawór, który precyzyjnie dozuje energię, zasila mocą, zmieniając stan energetyczny obiektu.

W przypadku parametrów, które są wektorami sytuacja się komplikuje, ponieważ regulacji podlegają wszystkie trzy parametry wektora: zwrot, kierunek, wartość. W przypadku tramwaju, w którym parametr kierunku narzucają szyny, regulacji podlegają zwrot i prędkość. Ze względu na delikatność ładunku, który przewozi tramwaj, oprócz prędkości dochodzi regulacja przyspieszania i hamowania.

Podobnie w samolocie, jeden parametr lotu zwrot nie występuje bo samoloty nie latają tyłem. Natomiast regulator, zwany autopilotem, steruje samoczynnie kursem, czyli kierunkiem i wysokością lotu.

Jeszcze bardziej komplikuje się regulacja, kiedy parametrem jest położenie elementu na płaszczyźnie lub w przestrzeni, określane w dwóch, lub trzech osiach układu kartezjańskiego. Przykładowo obrabiarka CNC manipuluje narzędziem na płaszczyźnie, ustalając jego położenie, w dwóch osiach układu kartezjańskiego. Sterując położeniem, steruje również prędkością i przyspieszeniem jego przemieszczania.

Robot przemysłowy, który operuje narzędziem w przestrzeni trójwymiarowej, aby je przemieścić, potrzebuje trzech sterowanych silników. Przemieszczając narzędzie po określonej trajektorii, musi zachować zadaną prędkość i przyspieszenie. W każdej osi posiada silnik i trzy regulatory: położenia, prędkości i przyspieszenia. Czyli trzy efektory w trzech osiach przekazują narzędziu energię kinetyczną i potencjalną.

Kaskada regulatorów

Jak już wcześniej powiedzieliśmy, zadaniem regulatora jest utrzymanie zadanej wartości parametru obiektu. Mówimy o parametrze, a myślimy o stanie energetycznym. Parametr, jak na przykład temperatura, ściśle określa stan energetyczny obiektu, według zależności: energia cieplna = masa obiektu pomnożona przez ciepło właściwe i przez różnicę temperatur. Podobnie z prędkością, która reprezentuje energię kinetyczną, według zależności: energia kinetyczna = masa obiektu pomnożona przez kwadrat prędkości i podzielona przez dwa.

Regulator, który utrzymuje wartość zadaną parametru, dozuje większą lub mniejszą ilość energii do obiektu. Regulując temperaturę, regulator odpowiednio uchyla zawór, dostarczając energię cieplną, co pozwala zachować odpowiednią wartość parametru regulowanego.

W przypadku regulacji prędkości nie wystarczy uchylić zawór do efektora, którym jest silnik. Jeżeli regulujemy prędkość tramwaju, to zbyt gwałtowne dochodzenie do prędkości zadanej skończyłoby się przewracaniem pasażerów. Dlatego, żeby zapewnić komfort jazdy obok regulatora prędkości stosujemy regulator przyspieszenia. Regulatory współpracują ze sobą.

Źródło: Internet

Jeżeli regulator prędkości chce zwiększyć prędkość, przesyła sygnał sterujący do regulatora przyspieszenia, a ten otwiera zawór do silnika efektora na tyle, żeby nie przekroczyć wartości zadanej przyspieszenia. Prędkość jest parametrem określającym poziom energii kinetycznej tramwaju, a przyspieszenie określa jak szybko ma ten stan osiągnąć. W przypadku tramwaju napięcie na silniku będzie określało parametr prędkości, a ilość prądu przepływającego przez silnik przyspieszenie. Inaczej ujmując, regulator prędkości prosi o przyspieszenie tramwaju na co regulator przyspieszenia łagodnie przyspiesza do czasu, aż regulator prędkości „podziękuje” za wykonanie przyspieszania, z chwilą uzyskania zadanej prędkości.

Kaskada regulatorów rozrasta się jeszcze bardziej, jeżeli mamy do czynienia z regulacją położenia. Rozpoczniemy od opisu regulacji w jednej osi (układu kartezjańskiego). Przykładowo, uchwyt narzędzia obrabiarki przesuwa się w prowadnicy do zadanego położenia.

Pierwszym regulatorem jest regulator położenia. Wprowadzoną wartość zadaną położenia porównuje z położeniem rzeczywistym uchwytu. Jeżeli uchwyt nie jest na swoim miejscu,

regulator poprosi następny regulator w kaskadzie o nadanie uchwytowi ruchu w kierunku właściwego położenia.

Drugim będzie regulator prędkości, który przekaże prośbę do następnego regulatora, regulatora przyspieszenia.

Trzeci regulator, przyśpieszenia, otworzy zawór do efektora, ale tylko na tyle, żeby przyspieszenie nie przekroczyło zadanej wartości.

Uchwyt rusza w odpowiednią stronę, przyspieszając z zadaną wartością. Osiąga zadaną prędkość przesuwu, którą steruje teraz regulator prędkości. Gdyby regulator przyspieszenia przymknął zawór za bardzo, spadła by prędkość. Wtedy regulator prędkości ponawia prośbę o większe uchylenie zaworu, co regulator przyspieszenia skwapliwie wykona.

Kiedy uchwyt zbliża się do żądanego położenia, regulator położenia zdejmuje sygnał prośbę do regulatora prędkości, regulator prędkości również dziękuje za akcję, a regulator przyspieszenia przymyka zawór silnika, efektora. Regulator położenia dopilnuje, aby uchwyt zatrzymał się we właściwym miejscu, regulator prędkości przypilnuje prędkości z jaką się przemieści, a regulator przyspieszenia, aby uchwyt nie przekraczał przyspieszeń. Trzy regulatory, za pomocą jednego efektora, przemieściły uchwyt do nowego miejsca z określoną prędkością i przyspieszeniem. Regulator prędkości sterował mocą potrzebną do pokonania tarcia, a regulator przyspieszenia mocą potrzebną do nadania uchwytowi energii kinetycznej.

Źródło: Internet

Gdybyśmy popatrzyli na ramię robota, które pracuje w trzech osiach układu kartezjańskiego, zauważamy, że do sterowania położenia uchwytu ramienia, w osi pionowej, doszłoby jeszcze sterowanie energią potencjalną. Trzy osie, w których pracuje ramię robota, wymagają trzech silników, efektorów, a sterowanie każdego silnika trzech regulatorów.

Źródło: Internet

Rozdział IV

Jakość regulacji

Chcąc ustalić sposób, w jaki regulator powinien sterować obiektem, musimy wpierw poznać wymagania i wyobrażenia jakie mają ci, którzy go eksploatują. Porównując wymagania i oczekiwania użytkowników z efektami pracy układu regulacji, będziemy mogli określić kryteria jakość regulacji.

Przemysłowe urządzenia, obiekty, pracują w reżymach technologicznych. Technolog procesu ściśle określa warunki pracy obiektu regulowanego. Sprawa jest prosta, regulator musi zapewnić dotrzymanie parametrów opisanych przez technologa. Technik od automatyki ustawia współczynniki regulatora tak, aby spełnione były wymagania technologiczne.

W przypadku badania satysfakcji ludzi, korzystających z pracy układów regulacji, sytuacja się komplikuje. Jeżeli zapytamy panią domu, jaka ma być woda do kąpieli usłyszymy: przyjemna. Jeżeli zaczniemy dopytywać o szczegóły, to się okaże, że rano chłodniejsza, wieczorem cieplejsza, w zimie cieplejsza, latem chłodniejsza.

Źródło: Internet

Przy nastawie parametrów w klimatyzatorze na pytanie na jaką temperaturę nastawić, ludzie odpowiadają: tak, żeby nie było ani za ciepło, ani za zimno. Badania wykazały, że tam gdzie

klimatyzacja obsługuje pomieszczenia w których przebywa wiele osób, wszelkie wysiłki, żeby zmniejszyć ilość niezadowolonych z działania klimatyzacji i tak kończą się na 10% niezadowolonych. Ocenie podlegają, nie tylko odczucia średniej temperatury, ale także szybkość zmian w górę lub w dół.

Jeżeli zapytamy podróżnego w pociągu, jak szybko powinien jechać pociąg, odpowie: żeby nie czuło się, że pociąg jedzie, chyba, że mi się spieszy, to niech jedzie szybciej. Oprócz oceny prędkości, oceniamy też szarpanie na boki, jak również w czasie zmiany prędkości, szarpania w przód i w tył.

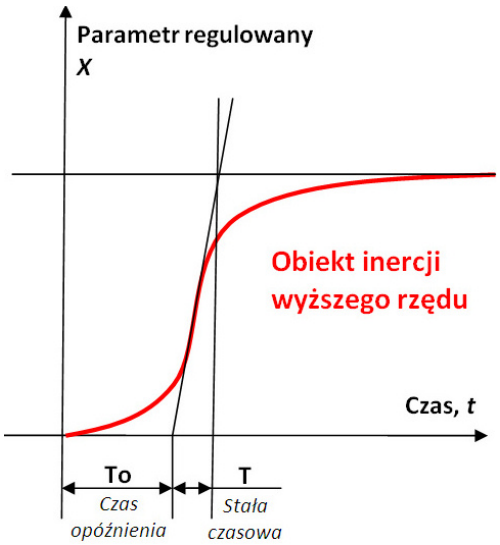
Jeżeli zapytamy biznesmena, który dostarcza te usługi, jaka ma być woda do kąpieli, jaka ma być prędkość pociągu, czy temperatura w pomieszczeniu klimatyzowanym, odpowie: ma być najtaniej i najszybciej. Czas to pieniądz.

Jeżeli zapytamy nadzór: sanitarny, ruchu, klasyfikacyjny, techniczny, itp., dowiemy się, że ma być bezpiecznie, zgodnie z przepisami, normami, ekologicznie, itp. Przykładowo, temperatura w klimatyzowanym pomieszczeniu nie może być niższa niż 7 °C w stosunku do temperatury otoczenia.

Jeżeli zapytamy automatyka, który buduje układy regulacji, na co zwrócić szczególną uwagę w jakości regulacji, zapewne wskaże najbardziej kosztowny element układu regulacji, którym jest zawór dozujący energię do efektora. Ustalając parametry dla regulatora, będziemy musieli wziąć pod uwagę sposób pracy zaworu. Im mniej ruchów wykona zawór w czasie regulacji, tym mniej się zużyje, tym dłużej będzie pracował, tym niższe będą koszty jego remontu.

Wszystkie uwagi, które przedstawiliśmy, dotyczące eksploatacji układów regulacji, opisują świat zewnętrzny systemu. Są również problemy wewnętrzne, związane ze stabilnością, wynikające głównie z inercji, występujących w różnych miejscach układu regulacji.

W praktyce, w układzie regulacji, największą bezwładność, czyli inercję, posiada obiekt. W układzie efektor – obiekt powstaje łańcuch inercji pierwszego rzędu. Im więcej elementów w łańcuchu, tym wyższy stopień inercji.



Rysunek przedstawia zmianę parametru regulowanego w obiekcie o inercji wyższego rzędu. Obiekt określają dwa parametry. Podobnie jak w obiekcie pierwszego rzędu, *stała czasowa T* określa szybkość kumulacji energii, a *czas opóźnienia To* jest czasem, po jakim energia poprzez efektor dotrze do obiektu.

ZAPAMIETAJ

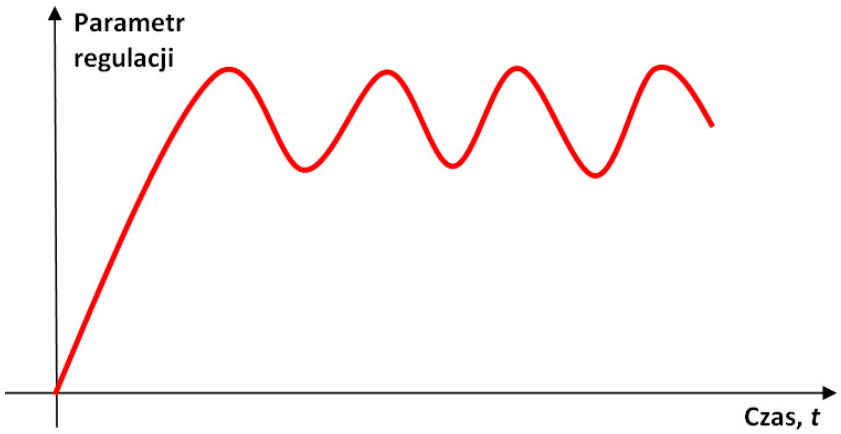
Wszystkie elementy materialne wchodzące w skład układu regulacji, posiadają inercję. W torze pomiarowym występują inercje związane z czujnikiem pomiarowym, jego mocowaniem, szybkością pracy przetwornika. W torze wykonawczym, podobnie, wyróżniamy inercje przetwornika sygnału wyjściowego, czas przestawiania zaworu, czas w jakim dopłynie energia do efektora, inercję przetwarzania w efektorze. Inercje elementów układu regulacji sumują się z inercją obiektu.

W torze pomiarowym regulatora inercje elementów opóźniają dotarcie informacji o stanie obiektu do regulatora. Czyli, stan obiektu się zmienia, a regulator zamiast działać - „śpi".

W torze wykonawczym regulatora inercje opóźniają dotarcie, zadysponowanej przez regulator, energii do obiektu. Regulator wysyła sygnał sterujący, ale dopiero po pewnym czasie otwiera się zawór, energia przepływa, zasilając efektor. Mija chwila, kiedy efektor przekształci energię, on też ma swoją inercję, i prześle energię do obiektu.

Obiekt zgodnie ze swoją inercją zmieni stan, a co za tym idzie zmieni się wartość parametru regulacji. Wartość parametru dotrze do regulatora po czasie wynikającym z inercji toru pomiarowego, a regulator wyśle dyspozycję zmiany mocy efektora do zaworu, która dotrze tam z opóźnieniem toru wykonawczego.

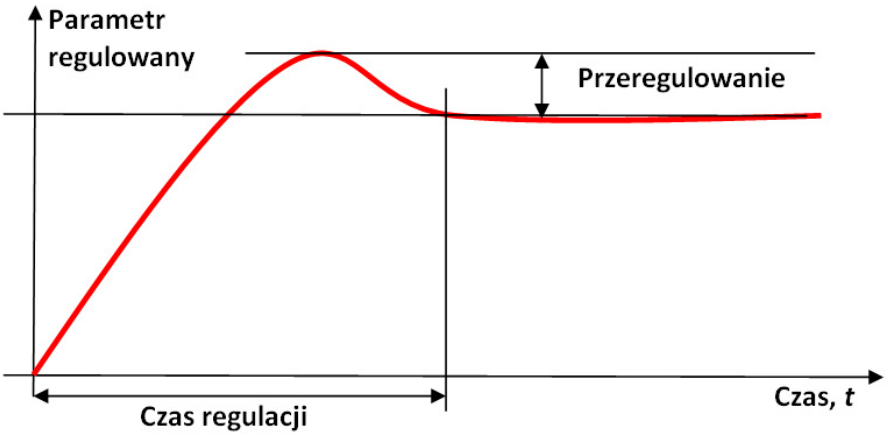
Opóźnienie wynikające z inercji toru pomiarowego może być tak duże, że kiedy obiekt wraca do równowagi i ją osiąga, regulator dysponując informacją sprzed chwili, nadal otwiera zawór. Mija chwila, teraz regulator dostaje informację, że obiekt jest już w stanie równowagi i wydaje polecenie do efektora, o skończeniu akcji. Mija chwila, kiedy efektor kończy akcję i zmniejsza moc. Jednak dla obiektu minęły już dwie chwile, od kiedy był w stanie równowagi.



Można powiedzieć, że regulator przez te dwie chwile działał na szkodę równowagi obiektu. Zamiast po osiągnięciu równowagi, zmniejszać reakcję, zwiększał ją. Bywa, że w takiej sytuacji układ regulacji wpada w drgania (oscylacje), które są szkodliwe szczególnie dla obiektu. A zatem, im mniejsza inercja torów pomiaru i wykonania w porównaniu z inercją obiektu, tym łatwiejsza i spokojniejsza praca układu regulacji.

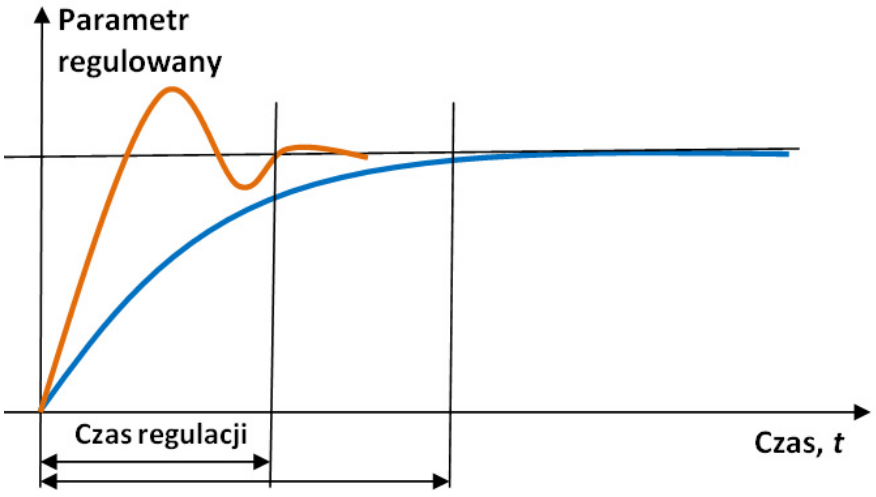
Nie zawsze mamy wpływ na konstrukcyjne rozwiązania przy budowie układu regulacji. W praktyce mamy jedynie dostęp do nastaw regulatora, czyli do zmiany jego współczynników: *wzmocnienia*, *czasu zdwojenia Ti* oraz *czasu wyprzedzenia Td*. Operując wartościami tych współczynników, musimy zapewnić układowi regulacji bezpieczną i stabilną pracę.

Jednym z najprostszych **kryteriów jakości regulacji** jest **czas regulacji** przy założonej **wielkości przeregulowania**.



Sprawdzenie jakości regulacji przeprowadzamy w czasie pracy układu regulacji. Zmieniamy skokowo wartość zadaną parametru o kilka procent. Zmiana wywołuje reakcję regulatora, który stara się doprowadzić układ z powrotem do równowagi. Rejestrujemy zmianę parametru w czasie dojścia do równowagi. Graficznie zaznaczamy przeregulowanie i sprawdzamy, czy jego wartość nie przekroczyła wartości granicznej przeregulowania. Następnie znajdujemy punkt, od którego wartość parametru osiąga nowy poziom równowagi i odczytujemy, ile czasu minęło od momentu zmiany wartości zadanej do osiągnięcia nowej równowagi. Ponieważ przeważnie wszystkim się spieszy, stąd **kryterium czasu regulacji pozwala tak dobrać współczynniki regulatora, aby minimalizować czas dojścia parametru regulowanego do nowego poziomu równowagi.**

ZAPAMIETAJ



Na poprzednim rysunku przedstawiono dwa, najczęściej występujące, kształty krzywych dojścia wartości parametru regulowanego do jego wartości zadanej. Krzywą z przeregulowaniem, bardziej dynamiczną, która posiada krótszy czas regulacji. Druga krzywa, bez przeregulowania, dochodzi aproksymacyjnie do stanu równowagi, obchodząc się o wiele delikatniej z obiektem podlegającym regulacji.

Wiele czynników, które trzeba uwzględnić przy ustalaniu nastaw regulatora, określają również kryteria oceny jakości regulacji. Po zbudowaniu i uruchomieniu układu, sprawdzamy jakość regulacji według tych kryteriów. Również po awariach, czy po przeglądach okresowych, sprawdzamy jakość regulacji według tych kryteriów.

CZĘŚĆ III

Homo Cyberneticus
(Człowiek sterujący)

Rozdział I

Palacz

I znowu spotykamy naszego bohatera z czasów „Ziemi obiecanej” (II połowa XIX wieku), bezrolnego chłopa, zwanego w e-podręczniku „Algorytmika” - Pradziadem. Chłop ów Bartłomiej poszedł do miasta Łodzi i tam zatrudniony został przez pryncypała von Borowieckiego do mieszania farb.

Borowiecki wzywa Bartłomieja do kantorka, i tak mu rzecze:

- Bartłomieju. Jak pewnie zauważyłeś, świat idzie do przodu, rozwija się, przyspiesza, zbliża się globalizacja, wszystko się modernizuje, tylko patrzeć, jak ktoś wymyśli smartfona. To też i my się modernizujemy, i już niedługo wprowadzimy nowy sposób barwienia tkanin na gorąco. Będziemy mogli szybciej barwić. A jak wiesz „czas to pieniądz”. Tak więc oprócz klarowania farby, będziesz ją podgrzewał i spuszczał na maszyny farbę o temperaturze 57°C. Zrozumiałeś?
- Co miałem nie zrozumieć. Klar.

Źródło: Internet

Zainstalowano nową kadź z paleniskiem pod spodem. Bartłomiej klarował farbę jak zwykle, a w międzyczasie palił węglem w palenisku, dopóki farba nie osiągnęła temperatury 57°C. Z początku ładował palenisko, podpalał i gdy temperatura doszła do 57 stopni, zalewał palenisko wodą, a resztę niespalonego węgla wygarniał. Po jakimś czasie zauważył, że ilość wygarnianego węgla jest zawsze taka sama. Następnym razem naładował o tyle węgla mniej. Rzeczywiście, nie musiał już zalewać paleniska. Po spaleniu węgla temperatura w kadzi była odpowiednia. Kiedy polecono, żeby klarować tylko pół kadzi albo jeszcze mniej, Bartłomiej wiedziony intuicją, zasypywał palenisko odpowiednio mniejszą ilością węgla. Po pewnym czasie doszedł do takiej wprawy, że mógł zapisać proporcje: ile węgla sypać na jaką ilość farby. Po pracy mógł już tylko odpoczywać w swojej izdebce i rozmyślać nad tym, co pryncypał miał na myśli, wspominając o jakimś smart - fonie. Słyszał o tele – fonie, ale żeby smart… dziwne.

Praca zrobiła się spokojniejsza. Po pracy nie czuł się już taki zmęczony, jak zwykle. Któregoś dnia pod wieczór zaszedł do pobliskiego kościoła i uwiedziony pięknymi głosami chóru, umówił się na następną próbę. Śpiewając w chórze, poznał wiele osób, między innymi Kazimierza. Po próbie zapytał przy herbacie:

- A czy ty wiesz Kazimierzu, dlaczego herbata jest gorąca?
- Dlatego że przygotowała ją pastorowa, kiedy przygotowuje ją pastor, wtedy jest przeważnie zimna.
- Nie o tym myślę. Pytam skąd ciepło w herbacie?
- A no widzisz mój drogi chórzysto - Kazimierz lubił popisywać się wiedzą.
- Najpierw pod kuchnią musimy nałożyć węgla, który zawiera w sobie dużo ciepła, mimo że jest zimny. Musimy go podpalić, żeby wydobyć z niego to ciepło. Ciepło nagrzeje fajerki, a od nich nagrzeje się czajnik, a w nim woda. Czyli woda przejmie ciepło z węgla, a przejmie go tyle, ile czasu będzie stał czajnik na fajerkach.
- Toś mądry, Kazimierzu.

Kazimierz wiedział o tym doskonale.

- A ile węgla trzeba wrzucić pod kuchnię, żeby zagrzać pełen czajnik?
- Skup się, to nie będzie proste.

Bartłomiej udał skupienie.

- Pełny czajnik do zagotowania wody potrzebuje tyle ciepła, żeby każdy kilogram wody w nim zawarty zdołał podnieść swoją temperaturę z tych 10°C wody ze studni do 100°C. Rozumiesz?
- Czyli ilość węgla, potrzebna do zagrzania wody, to tyle kilogramów spalonego węgla, aby uwolnione ciepło było równe ciepłu potrzebnemu do zagrzania wody.
- Brawo! Można powiedzieć, że zachodzi tu ścisła proporcja.

Źródło: Internet

Ich rozmowie przysłuchiwała się Pastorowa, usiłując zrozumieć, o czym rozmawiają. Tuż nad ich głowami dał się słyszeć sopran pastorowej:

- Czy komuś dolać gorącej herbatki?

Pewnie już zmęczyłeś się czytaniem. Zaparz sobie kubek herbatki. W ramach relaksu policz, ile zużyłeś ciepła i ile zapłacisz za energię elektryczną zużytą przy robieniu herbaty.

ĆWICZENIE

Ćwiczenie

Policz, ile zużyjesz ciepła i ile zapłacisz za energię elektryczną zużytą do zrobienia szklanki herbaty. Poniżej są dane niezbędne do rozwiązania zadania.

Energia cieplna (ciepło) ***Q = m × c × (T1 – T2)*** [kJ]

m – masa wody 0.2 kg *c* – ciepło właściwe 4,2 kJ/kg x K

temperatura wody przed ogrzaniem *T1* = 10°C

temperatura wody w stanie zagotowanym *T2* = 100°C

cena energii elektrycznej ok. 0.65 zł /kWh 1 kWh = kJ/s x h = 3600 kJ

Źródło: Internet

Minęło trochę czasu i Bartłomiej znowu jest wzywany do kantoru pryncypała. Wchodząc, od progu pyta pryncypała:

– Chyba nie wprowadzamy znowu jakichś udoskonaleń?
– W rzeczy samej – wprowadzamy.

Bartłomiej ciężko osunął się na krzesło.

– Co znowu?
– Głowa do góry. Zrobimy tak, żebyś nie musiał palić węglem. Będzie lżej i czyściej. Niedługo zainstalujemy maszynę parową do napędu maszyn w przędzalni i tkalni. Postawimy kotłownię i zasilimy gorącą parą również twoje balie do klarowania farby. Zamiast nosić węgiel i nim palić, będziesz tylko odpowiednio odkręcał i przykręcał zawór z gorącą parą, która podgrzeje farbę. Szybciej nagrzejemy – więcej zafarbujemy. Pamiętasz – „czas to pieniądz”.
– Teraz wszystko jasne skomentował pod nosem Bartłomiej – a jednak pieniądz a nie lżej i czyściej.
– Co tam mamroczesz?
– Nic, tylko się cieszę, że zarobimy więcej.

Borowiecki jakby dopiero teraz dostrzegł obecność Bartłomieja. Był zaskoczony jego uwagą.

– Jak to? - my zarobimy?

Minęło trochę czasu i rzeczywiście stanęły nowe większe zbiorniki z nagrzewnicami parowymi. Wybiałkowano pomieszczenie i zrobiło się biało, i czysto, jak w szpitalu, gdzie ostatnio Bartłomiej odwiedzał Kazimierza, któremu maszyna urwała rękę.

Pierwszego dnia Bartłomiej napełnił farbą zbiornik, następnie otworzył zawór z parą i zabrał się za klarowanie farby, wykonując mieszadłem sekwencję opracowanych przez siebie ruchów. Po jakimś czasie zauważył bąbelki na powierzchni farby. Spostrzegł, że farba zaczyna się gotować. Szybko pobiegł zakręcić zawór pary. Było jednak już za późno. Nie wiadomo skąd zjawił się pryncypał. I obok potoku przekleństw oraz złorzeczeń pryncypała popłynął drugi potok - przegotowanej i zwarzonej farby prosto do kanalizacji.

Jeszcze długo w nocy w izdebce dopalał się kaganek, a Bartłomiej, okrywszy plecy derką (bo ziąb tej nocy był okrutny), przeżywał swoją sromotę kolejny raz.

Następnego dnia po wstępnych przygotowaniach odkręcił zawór z parą, ale tylko troszeczkę. Siedział i patrzył na wskaźnik temperatury, na którym powoli, bardzo powoli rosła temperatura. Po dojściu do 57 °C zamknął zawór. Temperatura zaczęła spadać. Co robić? – zachodził w głowę. Znowu otworzył trochę zawór. Spadała wolniej. Jeszcze trochę otworzył – przestała spadać. Dobrze. Jednak nie do końca, bo termometr wskazywał 50°C. Otworzył jeszcze trochę – temperatura zaczęła rosnąć. Kiedy doszła do 57 kresek, przykręcił odrobinę zawór. Zawór był uchylony, a temperatura stała na 57 kresce.

Źródło: Internet

Po kilku takich doświadczeniach Bartłomiej zaznaczył sobie na pokrętle zaworu o ile trzeba otworzyć zawór, aby temperatura doszła do 57 kreski i stanęła.

W niedzielę Bartłomiej wybrał się z wizytą do szpitala - do Kazimierza. Po przekazaniu słoika z gęsim smalcem i kompotu, co to je ze wsi ostatnim razem przywiózł rozmowa zeszła na temat: a co tam w robocie nowego? Jako że mieli czasu pod dostatkiem, Bartłomiej w szczegółach opowiedział, jakie zmiany nastąpiły i jaką sromotę przeżył. Opowiedział również, jaki wymyślił sposób sterowania zaworem pary. Kazimierz, któremu co prawda urwało rękę, ale głowę nadal miał na swoim miejscu, po chwili zastanowienia tak do Bartłomieja rzekł:

- Drogi przyjacielu, nieźle żeś to wykombinował. Kiedy temperatura farby dojdzie do 57°C zostawiasz zawór na tyle uchylony, żeby ciepło z pary zrównoważyło straty ciepła zbiornika i parowania farby. To jest dobre. Ale powiedz mi, czy można by, zaraz po napełnieniu zbiornika zimną wodą, przy temperaturze 10°C otworzyć zawór do końca i niech farba się grzeje.

Bartłomiej zadrżał na całym ciele, bo sromota jak żywa stanęła mu przed oczami. Chciał coś powiedzieć, ale tylko zakaszlał.

- Oczywiście jak temperatura dojdzie do 50 kresek, wtedy przestawił byś pokrętło zaworu tam, gdzie zaznaczyłeś dla 57 stopni - wykrzyczał niemal Kazimierz.
- Podczas pełnego otwarcia zbiornik nagrzewałby się szybko, a na końcu powoli doszedłby do 57°C.

Przeprowadzone w poniedziałek eksperymenty całkowicie potwierdziły Kazimierzowe pomysły. Bartłomiej otwierał zawór do końca w czasie napełniania zbiornika i czekał aż temperatura osiągnie 50 stopni, a następnie przymykał zawór do miejsca zaznaczonego na pokrętle. Działało świetnie. Czas nagrzewania skrócił się do 12 minut. W ten sposób Kazimierz wymyślił, a Bartłomiej wdrożył, funkcję regulatora zwaną współcześnie wyprzedzeniem.

Minęło kilka dni. Bartłomiej, który nie był już bezrolnym chłopem, a stawał się robotnikiem i to specjalistą od sterowania nie przestawał myśleć. Nie dawało mu spokoju: dlaczego aż 12 minut? Czy dało by się szybciej? (widać zaraził się „czas to pieniądz” od pryncypała). Przy następnej wizycie u Kazimierza podzielił się swoją wątpliwością. Kazimierz, który akurat miał bóle fantomowe, odczekał chwilę i tak rzecze do Bartłomieja:

- Mój drogi - tu przybrał wyraz twarzy mędrca i jakby odpłyną do jakiegoś lepszego świata.
- Podgrzewanie wody zasadza się na dostarczaniu ciepła, czyli energii. Woda w zbiorniku powiększa swoją energię, a ty jej stan mierzysz za pomocą termometru. Im więcej ciepła / energii zawiera woda, tym wyższą posiada temperaturę. A zatem, im więcej w zbiorniku wody i im wyższa temperatura tym więcej energii. Ciekawe – prawda?
- No nie wiem czy zrozumiałem?
- To powiedz, jak zrozumiałeś.
- Zrozumiałem, że jak w zbiorniku podgrzewam wodę, to dostarczam jej energię / ciepło i mogę je mierzyć termometrem.
- Dobrze.
- Nie do końca. Jeżeli to jest prawdą, to dlaczego przy 57 stopniach nie mogę zamknąć zaworu, tylko musi być trochę otwarty?

Tu Kazimierz podrapał się w nogę fantomową ręką, bo go akurat zaswędziała.

- Widzisz, gorący zbiornik rozprasza swoją energię i te ubytki musisz na bieżąco uzupełniać, ciągle dostarczając energię.
- Teraz już wszystko wiem. Chociaż nie daje mi spokoju, dlaczego nie mogę podgrzać zbiornika szybciej niż te 12 minut. Czy można szybciej?

Tu myśl Kazimierza powróciła do problemu z protezą, którą będzie musiał sam sobie wystrugać. Może zamiast zwykłego haka na końcu dałoby się zrobić jakiś sterowany uchwyt?

Źródło: Internet

Ale już po chwili był gotowy, żeby zaspokoić ciekawość przyjaciela.

- Szybkość nagrzewania zbiornika z wodą zależy od ilości ciepła, które pochłonie woda, a z drugiej strony od szybkości, z jaką jesteśmy w stanie dostarczyć tyle ciepła. Czyli z jednej strony ilość wody i jej pojemność cieplna, z drugiej moc nagrzewnicy parowej. Rozumiesz?
- Może powiem własnymi słowami. Para wodna w nagrzewnicy oddaje wodzie pewną ilość ciepła, powiedzmy w ciągu minuty. Po 12 minutach tyle ciepła przedostanie się do wody, że zmierzymy to ciepło za pomocą termometru i będzie 57 °C.
- Nie do końca przyjacielu.

Rzekł, poprawiając sobie poduszkę.

- Temperatura tylko reprezentuje ciepło. Żeby zmierzyć ilość ciepła albo lepiej dostarczonej energii cieplnej musisz od temperatury 57 stopni odjąć początkową temperaturę i otrzymasz przyrost temperatury przy podgrzewaniu. Ten przyrost przemnożysz przez ilość wody oraz przez współczynnik pojemności cieplnej wody i otrzymasz ilość ciepła.
- Toś ty mądry, Kazimierzu.
- Nalej mi kompotu, bo mi w gardle zaschło od tych wykładów.
- Pij, pij. Jeszcze nie odpowiedziałeś na moje pytanie. Czy można szybciej?

Kazimierz odstawił pusty kubek po kompocie. Stłumił beknięcie, przysłaniając usta fantomową dłonią.

– Przyjacielu. Widzę, że i ciebie opanowała gorączka pieniądza. „Czas to pieniądz” - jak mówią. Spieszy ci się. Mnie też się spieszyło, ale jak widzisz, już mi przeszło. Bez ręki jakoś mi się mniej spieszy. Ale do rzeczy. Nie da się szybciej. Twoją balię z farbą cechuje bezwładność zwana inercją. O wielkości tej inercji decyduje ilość farby w zbiorniku – jej masa oraz moc nagrzewnicy parowej. Jeżeli nie możesz zmienić ilości farby i mocy nagrzewnicy, to inercja pozostaje bez zmian, zostajemy przy twoich 12 minutach.

W głębi korytarza dał się słyszeć mocny głos siostry Marii.

– Lewatywa panowie!!
– Dziękuję ci Kazimierzu za wszystko. Będę leciał.
– Nie spiesz się tak, to nie do ciebie.

Bartłomiej uniósł się z krzesła, podciągnął portki i zbierał się już do wyjścia. Kiedy zbliżył się do drzwi, drogę zastąpiła mu potężna siostra Maria.

– A dokąd to? Teraz lewatywa.

Bartłomiej pobladł. Odruchowo schwycił się za portki.

– Żartowałam.

Powiedziała z lekkim uśmiechem Maria.

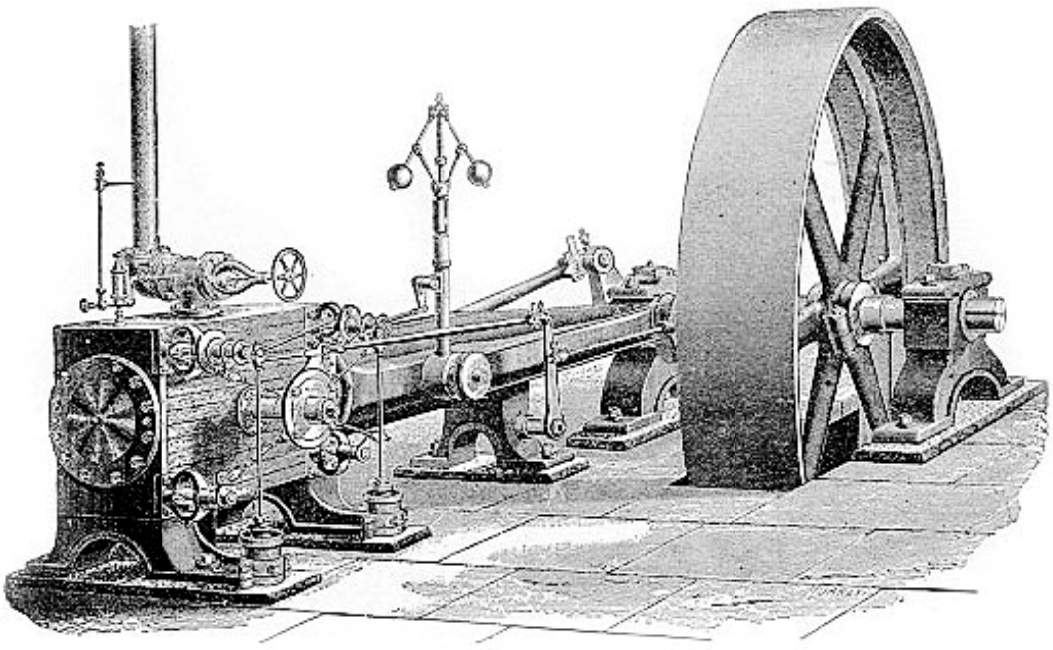
Źródło: Internet

Rozdział II

Maszynista

Świat się zmienia, rewolucja technologiczna postępuje, końską siłę pociągową wypiera maszyna parowa. Drapieżny kapitalizm dociera do miasta Łodzi. Czas to pieniądz. Szybciej, szybciej, szybciej! Spóźniłeś się – bankrutujesz. Również i w fabryce von Borowieckiego do napędu maszyn włókienniczych została zainstalowana maszyna parowa. Pryncypał wezwał Bartłomieja i tak do niego rzecze:

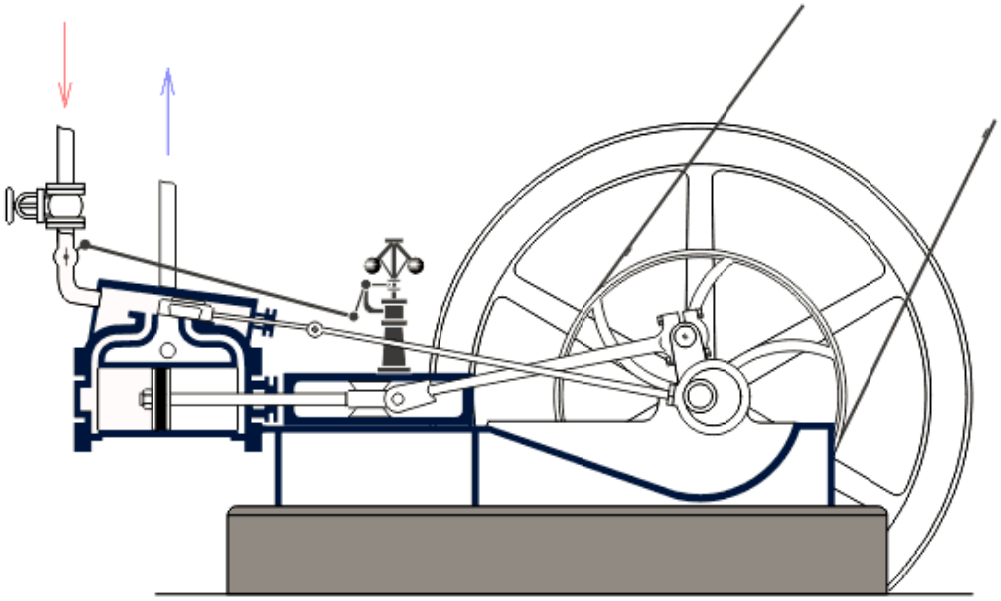
- Wydajesz mi się najbardziej zmyślny wśród robotników w fabryce. Umyśliłem sobie, żeby Cię zatrudnić przy nowej maszynie. I tak nikt się nie zna na jej oporządzaniu. Dasz sobie radę. A jeśli wszystko będzie klar to dostaniesz podwyżkę.
- I piękną księżniczkę za żonę - dodał bezgłośnie Bartłomiej.



Źródło: Internet

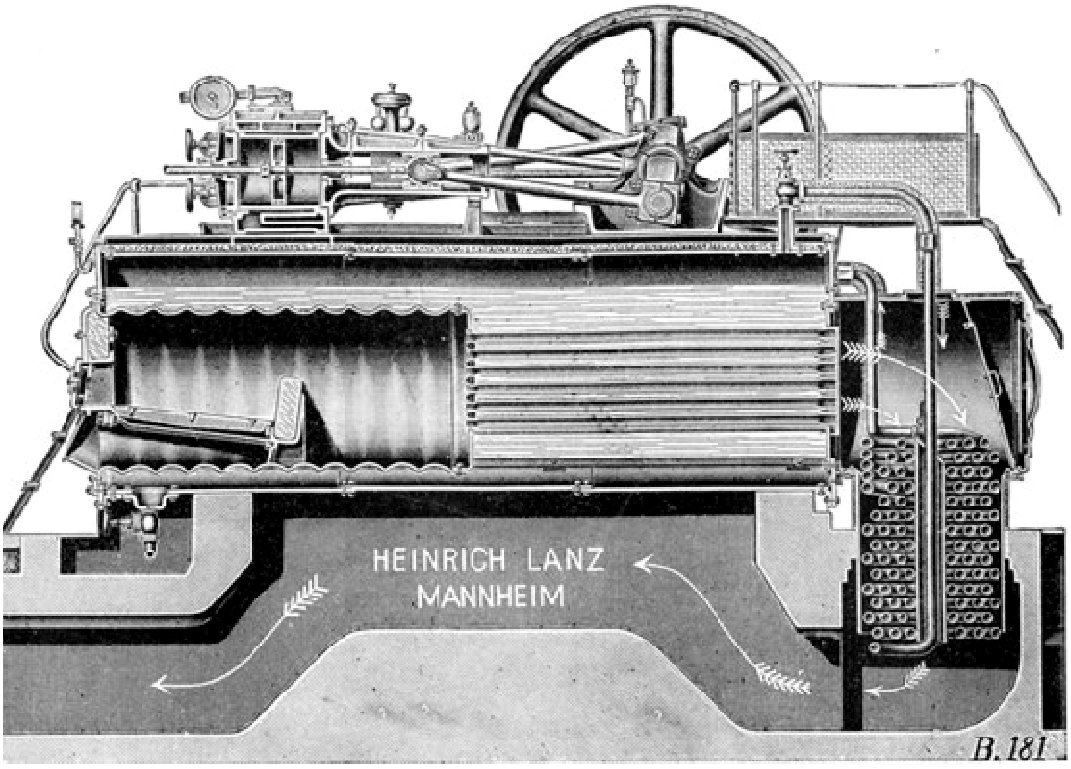
Maszynę parową sprowadzono z Anglii i zamontowano. Kotłownię zbudowano obok hali z maszynami włókienniczymi. Maszyny połączono z wałem napędowym pasami z mocnej wołowej skóry. Głównym zajęciem Bartłomieja było napełnianie olejem maszynowym olejarek na łożyskach oraz zakładanie i zrzucanie pasów przy uruchamianiu i odstawianiu kolejnych maszyn. Na początku pracy trzeba było uruchomić maszynę i zaworem dolotowym

pary ustawić obroty maszyny na wartość 150 obrotów na minutę. Po kilku dniach pracy przy maszynie zauważył, że po załączeniu lub odstawieniu kilku maszyn zmieniają się obroty maszyny parowej.



Źródło: Internet

Chętnie podzieliłby się z kimś tym spostrzeżeniem, ale nie bardzo miał z kim. Ludzie trochę się go bali, widząc jak obcuje z maszyną buchającą parą. Nawet powstała plotka, że ktoś kto nie boi się takiego potwora, musi mieć konszachty z samym diabłem. Po pracy w swojej izdebce, siedział na zydlu okryty derką (bo ziąb był okrutny tej nocy), a myśl pewna nie dawała mu spokoju. Zastanawiał się, jaka jest zależność między uruchamianiem i odstawianiem kolejnych maszyn włókienniczych, a zmianą obrotów maszyny parowej.

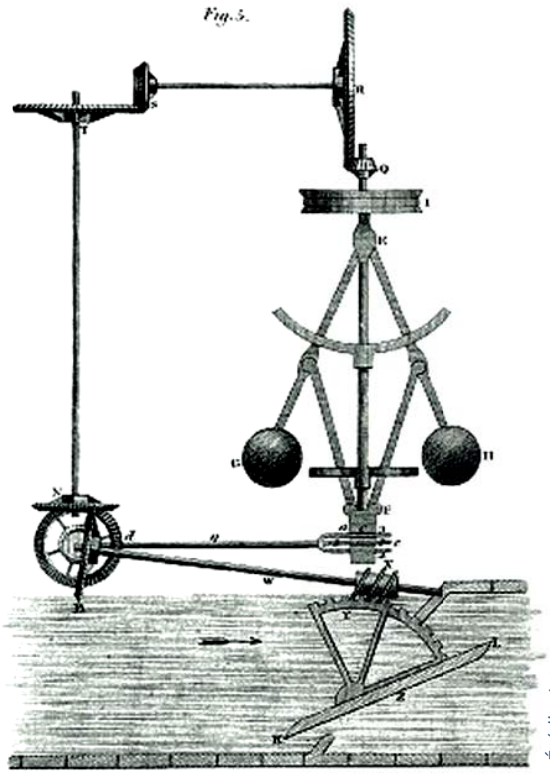


Źródło: Internet

Następnego dnia, obserwując zachowanie maszyn, rozwiązał zagadkę: im więcej pracujących maszyn włókienniczych tym obroty niższe. Po pracy w swojej izdebce… Następnego dnia wiedział już, że przy uruchamianiu kolejnych maszyn trzeba otwierać bardziej zawór z parą dolotową do maszyny parowej, a wtedy obroty „wracają" do wartości 150 obr/min. Po paru dniach doświadczeń zaznaczył sobie kreskami - na pokrętle zaworu – miejsca, w których należy ustawić pokrętło, żeby przy danej ilości załączonych maszyn obroty maszyny parowej wynosiły 150 obr/min. Zauważył też, że przy uruchomionych wszystkich maszynach zawór był otwarty prawie do końca. Przy załączonej połowie maszyn był otwarty w połowie, a przy uruchomionych kilku był ledwie otwarty.

I mógłby Bartłomiej tak pracować do samej emerytury (wtedy nie było emerytur), gdyby nie pryncypał, który zafascynowany nowinkami technicznymi i dysponujący zyskiem z wyjątkowo intratnego kontraktu dostaw dla wojska, kazał zainstalować do maszyny parowej **regulator WATTA**.

Fachowcy z Anglii zamontowali regulator i powiedzieli Bartłomiejowi, że od teraz regulator zajmie się pilnowaniem właściwych obrotów. Będzie to robił sam z siebie. Mimo protestów Bartłomieja, że przecież trzeba przestawiać zawór, liczyć ilość załączonych maszyn, a nawet sprawdzać, czy nie „siadło" ciśnienie na kotle, uspokajano go , że regulator da sobie radę z tym wszystkim i obroty maszyny parowej zawsze będą wynosiły 150 obr/min. Maszyna ruszyła. Bartłomiej co chwilę podbiegał zaniepokojony i sprawdzał, czy wskaźnik obrotów pokazuje jedynie słuszne obroty. Wskazówka stała w miejscu jak przynitowana.



Źródło: Internet

Po najbliższej próbie chóru, kiedy wszyscy zasiedli do stołów, żeby napić się herbaty, spróbować niezawodnego pischingera zrobionego przez żonę Pastora i pogadać, Bartłomiej zagadnął Kazimierza o maszyny. Kazimierz pracował w maszynowni w fabryce Niemca Wolfa. Od słowa do słowa Bartłomiej zwierzył się Kazimierzowi ze swojej wątpliwości, że przecież nie może tak być, żeby jakieś urządzenie regulowało się samo.

– To chyba byłby jakiś cud – rozejrzał się trochę bojaźliwie po wnętrzu kaplicy. Statek musi mieć sternika, wóz musi mieć woźnicę to i maszyna musi mieć nastawiacza, który by nią kierował.

Kazimierz od dawna pracował przy maszynach parowych z regulatorem WATTA. Roześmiał się i tak rzekł do Bartłomieja:

- Drogi Bartłomieju, to żaden cud, to technika. Pamiętasz te dwie kule, które się kręcą, jak karuzela w sobotę.
- Tak – odpowiedział.
- Otóż te kule przy odpowiednio wysokich obrotach unoszą się. Zauważyłeś?
- Nie – pokręcił głową.
- Przy odpowiednich obrotach siła odśrodkowa przewyższa ciężar kul i kule unoszą się i poprzez cięgno przestawiają zawór dolotowy pary, przymykając go. Im wyższe obroty tym wyżej unoszą się kule i tym bardziej zamyka się zawór. Mniej więcej w połowie wychylenia kul zawór jest też otwarty w połowie. Tak więc widzisz mój drogi – rzekł Kazimierz – gdybyś zamiast myśleć o cudach, skupił się na technice, to byś zauważył, jak i kiedy unoszą się kule oraz to, że zmieniają się obroty, tyle że w bardzo małym zakresie.

Obserwacje wykonane następnego dnia potwierdziły to, co opowiadał Kazimierz. Przy rozruchu maszyny zawór był otwarty całkowicie, aż obroty narosły do 145. Wtedy zawór zaczął się przymykać i przy obrotach 150 był otwarty w połowie. Kiedy przy odstawianiu maszyny parowej, maszyny włókiennicze były odłączone, wskaźnik obrotów pokazywał 155 obr/min, a zawór parowy był prawie całkowicie zamknięty. To jednak technika – rzekł do siebie Bartłomiej. Cały zakres pracy regulatora mieści się między 145 a 155 obr/min, co odpowiada otwarciu zaworu pary pomiędzy 100% a 0% i zmianę uciągu maszyny od 100% do 0% mocy. Bartłomiej podniósł oczy do góry, spojrzał w niebo i myśl mu taka zaświtała. Poszedłem do Kościoła, kiedym myślał, że to cud. A tam, dzięki Bogu, Kazimierz mnie oświecił, że to technika. (Nie mógł pomyśleć – regulacja automatyczna – a regulatora nazwać proporcjonalnym P - ponieważ te pojęcia powstaną około połowy XX wieku.)

Minął jakiś czas.

Po próbie chóru Bartłomiej tak zagadnął Kazimierza.

Źródło: Internet

- Kazimierzu, a czy ty wiesz, że zamontowali u nas nowe urządzenie i teraz obroty naszej maszyny parowej, mimo zmiany obciążenia przez kolejne dołączanie maszyn, nie zmieniają się ani o jotę.
- Nie może być – odpowiedział Kazimierz. Takich urządzeń nie ma. Chyba wierzysz w cuda. Przecież, żeby otwierać zawór pary i go przymykać musi zaistnieć różnica obrotów. Różnica obrotów poprzez cięgno zmienia otwarcie zaworu.

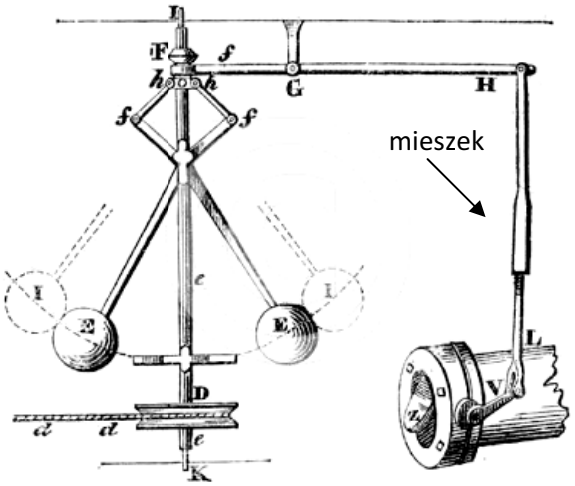
Przecież ci tłumaczyłem, jak działa regulator Watta, strofował go Kazimierz. Bartłomiej tajemniczo się uśmiechnął i tak protekcjonalnie rzecze do Kazimierza.

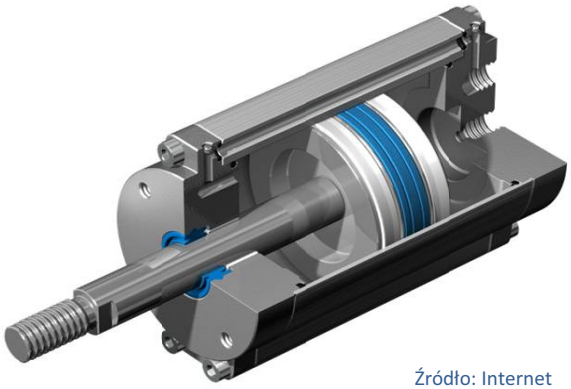
– Mój dobry Kazimierzu. Otóż mój pryncypał von Borowiecki z kolejnej szalonej podróży z panią Cuker przywiózł nowy wynalazek – **regulator WOODWARDA**. Tenże regulator po zamontowaniu tak steruje zaworem, że nie występuje żadna różnica obrotów w czasie obciążania maszyny. Co prawda w chwili dołączania następnych maszyn włókienniczych obroty trochę się zmienią, ale już po chwili znowu jest 150 obr/min.

Kazimierz pokiwał głową.

– Być nie może. To chyba jakiś cud.

Bartłomieja rozpierała duma.





Źródło: Internet

– Nic takiego. Cały tydzień patrzałem na to cudeńko i nie mogłem pojąć, jak to działa. Dopiero słoik smalcu gęsiego i kwaterka okowity com je przywiózł ostatnio ze wsi przekonały jegomościa, który montował regulator, żeby mi powiedział, jak to działa. I tak ci powiem Kazimierzu – zmyślnie to chłopaki wykombinowali. Otóż do regulatora Watta jaki znasz zamontowali mały zbiorniczek zwany mieszkiem, który się wydłuża, kiedy napuścić do niego parę pod ciśnieniem. Zamontowali go tak przemyślnie w połowie długości cięgna zamykającego zawór parowy, iżby ciśnienie w mieszku wydłużało mieszek, a co za tym idzie, wydłużało całe cięgno. Im wyższe ciśnienie w zbiorniczku tym bardziej wydłużone cięgno, tym bardziej otwarty zawór pary, tym wyższe obroty maszyny. Nie za szybko tłumaczę?
– Mów dalej, powiedział Kazimierz.
– Natomiast na wskaźniku obrotów zamontowali mały zaworek, który kiedy wskazówka pokazuje poniżej 150 obr/min, otwiera dopływ pary do mieszka, powoli napełniając go, wydłużając cięgno. Przy pozycji wskazówki obrotów powyżej 150 zaworek odłącza dopływ pary, a otwiera upust pary z mieszka. Nie za szybko?

- Mów.
- Czyli, obroty maszyny przykładowo spadają, więc cięgno otwiera bardziej zawór pary jak to w regulatorze Watta. Po chwili jednak, napełnia się mieszek, wydłużając cięgno jeszcze bardziej otwierając zawór z parą. I będzie je wydłużał, dopóki obroty nie wrócą do 150. Proste a zarazem genialne – prawda Kazimierzu.

Kazimierz milczał, był głęboko zamyślony. Widać że jednak coś nie dawało mu spokoju. Czy wszystko się zgadza Kazimierzu?

- Nie – odrzekł Kazimierz.

Szelmowski uśmieszek na obliczu Kazimierza zdradzał błyskotliwość riposty.

- Kiedy obroty spadają poniżej 150, mieszek zacznie wydłużać cięgno, wtedy obroty zaczną rosnąć, a regulator zacznie przymykać zawór, działając przeciw mieszkowi. Mieszek otwiera, a regulator zamyka – to jak to jest? Przyłapałem cię na sprzeczności.
- Spostrzegawczy jesteś Kazimierzu. Mnie też to z początku zaniepokoiło. Kilka dni obserwacji i rozmyślań w izdebce pod derką… pozwoliło wyciągnąć pewne wnioski. Po pierwsze – regulator Watta przy spadku obrotów reaguje od razu otwierając zawór, otworzy go o tyle, o ile spadną obroty - proporcjonalnie. Czyli w naszej maszynie zawór zastanie otwarty do końca, jeżeli obroty spadną do 145. Rozumiesz?
- Tak – sam ci to kiedyś tłumaczyłem.
- To teraz drugi wniosek. Mieszek z zaworkiem działa zupełnie niezależnie od regulatora odśrodkowego. Napełnianie mieszka nie zależy od ilości brakujących obrotów. Mieszek napełnia się, kiedy obroty są poniżej 150, a wydłużenie mieszka, a również cięgna, zależy od czasu napełniania. Nie za szybko mówię?
- Mów dalej. Chyba rozumiem.
- To powiedz, jak rozumiesz.
- No więc, pod wpływem wydłużającego się mieszka zawór nadal się otwiera i obroty rosną, wtedy regulator odśrodkowy zmniejsza swoje oddziaływanie, dopóki przy 150 obrotach, jego oddziaływanie równa się zero. Wtedy stan otwarcia zaworu pary zależy tylko od długości mieszka. Przy 150 obrotach zamknie się zaworek napełniania mieszka i maszyna będzie pracowała do najbliższej zmiany obciążenia, kiedy powtórzy się doregulowanie do 150 obr/min.
- Dobrze Kazimierzu jesteś wielki. A co się stanie Kazimierzu Wielki jak odłączymy maszyny i obroty podskoczą powyżej 150.
- To proste. Najpierw regulator odśrodkowy przymknie zawór pary, a następnie otworzy się zaworek upuszczający parę z mieszka, który będzie się skracał, przymykając zawór pary dopóki obroty nie dojdą do 150. Wtedy wyłączy się zaworek upuszczania pary. Obroty wyniosą 150.
- Brawo Kazimierzu, do tego jesteś mądry.

Ich rozmowie od pewnego czasu przysłuchiwał się ksiądz, będący również dyrygentem i założycielem chóru. Zapytali go: co sądzi o takich wynalazkach? Ksiądz zamyślił się i mówi tak.

– Ja jednak uważam takie urządzenia za cud. Zbudowali je ludzie na podstawie intuicji. A już Platon czterysta lat przed Chrystusem opisywał intuicję jako boski pierwiastek w ludzkiej duszy i jej rozumie. Teoria układów regulacji i regulatorów z jej opisem matematycznym powstanie za jakieś sto pięćdziesiąt lat. Wtedy dowiemy się, że to o czym opowiadacie to regulator typu PI, proporcjonalno – całkowy. A to, że w dzisiejszych czasach takie urządzenie działa i wspomaga ludzką pracę, zakrawa na cud.

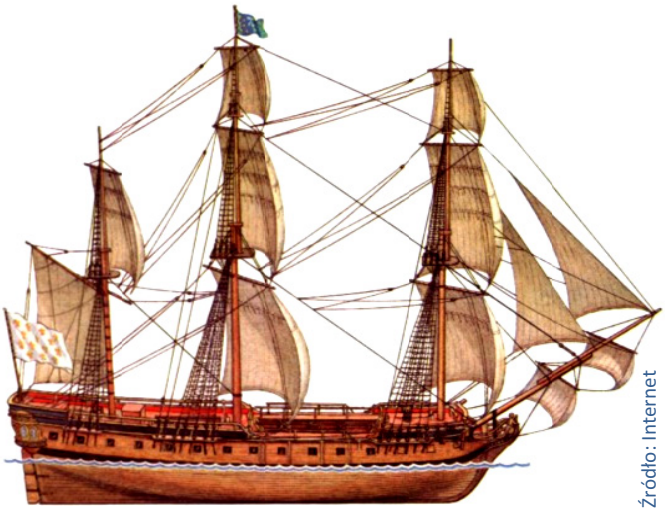
Po tych słowach Bartłomiej się zamyślił. Dopiero co, w tym Kościele, Kazimierz przekonał mnie, że to nie żaden cud tylko technika. A może jednak genialne wynalazki posiadają jakąś iskrę bożą, może potrzebne jakieś natchnienie, jakaś intuicja. I tak rozmyślając udał się do swojej izdebki…

Rozdział III

Sternik

Bartłomiej, dowiedziawszy się o wyjściu Kazimierza ze szpitala, wsadził za pazuchę ostatnią kwaterkę okowity, słoiczek szpeku i wybrał się w odwiedziny. Kazimierz miał teraz dużo wolnego czasu. Jego głównym zajęciem było drapanie swędzącej fantomowej ręki. Z wielką radością przywitał przyjaciela. Kiedy po wychyleniu kilku kuśtyczków okowity i zakąszeniu pajdą chleba ze szpekiem, Kazimierz nabił i zapalił fajkę, rozsiedli się wygodnie do pogawędki.

– Drogi Kazimierzu, obiecałeś mi jeszcze w szpitalu opowiedzieć, skąd wiesz tyle o sterowaniu maszynami? Skąd u ciebie taka mądrość?
– Widzisz przyjacielu, teraz mam dużo czasu, więc możemy powspominać. Zaczęło się dawno temu. Kiedy byłem młodzikiem, mówili, że mnie ciągle gdzieś nosi. Charakter miałem raczej niespokojny, awanturniczy. Nie mogłem nigdzie zagrzać miejsca. Tak, że po paru latach płynąłem na statku holenderskim szlakiem herbacianych kliprów do Makao po goździki i pieprz. Ale i to mi nie wystarczało. Po kilku rejsach zaokrętowałem na fregatę Jego Królewskiej Mości do ochrony statków handlowych przed piratami. Byłem zwykłym majtkiem, ale że charakter miałem niespokojny i nie mogłem usiedzieć na jednym miejscu, włóczyłem się po całym okręcie i podglądałem prace innych marynarzy. Najciekawsze wydawało mi się to, co robi sternik. A sternikiem był potężny Hans. Był niezbyt rozmowny, ale widząc moje zainteresowanie, odpowiadał na pytania. Zwłaszcza w czasie nudnych rejsów w passatach jego monosylaby i skinięcia głową można by uznać za gadatliwość. Kapitan widząc moje zainteresowanie sterowaniem, kilka razy wypróbował moje umiejętności i mianował pod sternikiem – młodszym sternikiem. I wtedy zdarzył się ten fatalny wypadek. Otóż,



Źródło: Internet

kiedy na morzu Południowo Chińskim u wybrzeży Formozy po pościgu za dżonką piratów, już mieliśmy ich dopaść i odpaliliśmy salwę całą burtą, jedno działo eksplodowało. Odłamek zabił Hansa na śmierć. Niedługo potem po zderzeniu z górą lodową, mój okręt poszedł na dno – człowiek uczy się na błędach – admirał kazał mnie rozstrzelać. Siostra Maria, pielęgniarka z tutejszego szpitala, okryła mnie białym welonem i oświadczyła, że mnie kocha. Admirał znał stary obyczaj marynarki królewskiej. Kiedy dziewica okryje welonem młodzieńca, wtedy daruje mu się życie. Machnął ręką z rezygnacją - zapowiadała się w końcu jakaś rozrywka – i odwołał egzekucję.

Bartłomiej tylko pokręcił głową z niedowierzaniem.

– Tak, tak to ta sama siostra Maria od lewatywy. Wróciłem do miasta Łodzi. Jakiś czas potem zjawiła się Maria. Jeszcze raz oświadczyła, że mnie kocha, ale miłością platoniczną. Ja będę pracował przy sterowaniu maszynami, a ona będzie spalała się w miłości, pielęgnując chorych w tutejszym szpitalu.
Ale nie o tym mieliśmy mówić tylko o sterowaniu. Otóż, po oddaniu Hansa morzu zostałem sternikiem na okręcie. Nie musiałem biegać po rejach, ciągnąć lin, kabestanem wyciągać kotwicy. Stałem na mostku, trzymałem oburącz koło sterowe, przed sobą miałem kompas, a dalej horyzont. Los okrętu i załogi spoczywał w moich rękach. Jak tylko kapitan napełniał się rumem, ja byłem najważniejszy.

Bartłomiej patrzył na Kazimierza jak zahipnotyzowany, z wielkim podziwem. Kazimierz jeszcze chwilę miał pod nogami pokład latającego holendra, gdzieś na morzach południowych. Powoli wrócił do izby. Spojrzał na Bartłomieja.

– Ależ mieliśmy mówić o sterowaniu. Klepnął się fantomową ręką w udo. Zadaniem sterowania jest utrzymywać statek na kursie. Kurs podaje kapitan. Patrzysz na kompas i tak ustawiasz ster, żeby statek trzymał się kursu. Na morzach południowych wieją stałe wiatry. Nie zmieniają kierunku ani siły. Chyba że dopadnie cię cyklon albo flauta. Wracając do stałych wiatrów. Ożaglowanie raz postawione się nie zmienia, ster ustawiasz tak, żeby statek był na kursie i możesz oddać się marzeniom lub zadumie nad pięknem tego świata. Co jakiś czas wprowadzasz lekką korektę ustawienia steru i statek sam płynie do celu. Inaczej wygląda sterowanie, kiedy zbliżasz się do Europy. Tu masz do czynienia ze zmiennymi wiatrami i zmiennymi prądami wody. Co rusz zrzucają jakieś żagle albo stawiają. Zmienia się kurs, omijać trzeba przeszkody, wiatr zmienia kierunek i siłę. Zmienia się prędkość statku, co za tym idzie skuteczność oddziaływania steru. Wyobrażasz to sobie?

Kazimierz spojrzał w oczy Bartłomieja.

– Tu dopiero sprawdza się cały kunszt sternika.

Bartłomiej pokiwał ze zrozumieniem głową – głębokie westchnienie wydobyło się z jego piersi.

- Po latach żeglowania wyrobiłem sobie sposób sterowania przy spokojnej żegludze. Kiedy statek płynie w stałych warunkach wyznaczonym kursem, ster wychylony jest tak, że siła oddziaływania steru równoważy wszystkie siły, spychające statek z kursu. Jeżeli statek powoli zacznie schodzić z kursu wtedy wychylam ster troszeczkę, żeby zrównoważyć tę siłę. Statek wraca na kurs. Kiedy brakuje odrobinę do powrotu na kurs, zmniejszam wychylenie steru. Patrzę, czy wróci dokładnie na kurs. Jeżeli przejdzie dalej trochę jeszcze zredukuję wychylenie. I tak wkoło. Widzę, w którą stronę zbacza z kursu, kontruję ten ruch minimalnym wychylenia steru w przeciwną stronę. Takie zachowanie statku nazywam „myszkowaniem". Rozumiesz to?
- No tak. Im bardziej statek zszedł z kursu, tym bardziej wychylasz ster w przeciwną stronę, a kiedy wraca na kurs redukujesz to wychylenie.
- Dobrze, tylko pamiętaj, że korektę wprowadzasz od wychylenia steru, który utrzymuje statek na kursie, czyli w równowadze.
- Jasne, a co robisz jak przyjdą porywy wiatru?
- A, no właśnie, tu sprawa jest trudniejsza. Nie wystarczy stwierdzić, o ile stopni statek zszedł z kursu. Tutaj trzeba wyprzedzać działania wiatru. Obserwując kompas nie tyle interesujesz się, o ile stopni statek zszedł z kursu. Ważniejsza jest prędkość tego schodzenia. Im szybciej ucieka, tym bardziej wychylasz ster, żeby przeciwdziałać ucieczce. Z czasem zauważyłem, że po wydęciu żagli można przewidzieć siłę reakcji i szybkość ucieczki z kursu. Im większe uderzenie w żagle tym większe wychylenie steru i to mimo, że na kompasie nie widać jeszcze reakcji. Można też obserwować zbliżający się szkwał na powierzchni wody i uprzedzić jego uderzenie w statek korekcją wychylenia steru. Sternik przewiduje co się za chwilę stanie i odpowiednio reaguje wychylając ster.

Źródło: Internet

- A to ciekawe, co mówisz Kazimierzu. Toż ten sternik jak prorok musi przewidywać przyszłość.
- Nie przesadzaj z tym prorokiem, za jakieś 150 lat ludzie zbudują urządzenie , które nazwą AUTOPILOTEM i które samodzielnie będzie sterowało statkiem i utrzymywało go na kursie.
- Chociaż to, co teraz mówisz jest jednak jakimś proroctwem.

I w takim nastroju się rozstali. Bartłomiej przypomniał sobie o stosie skarpet do cerowania, które czekały na niego w izdebce. Jego proroctwo przewidywało, że jeżeli ich nie zaceruje, do roboty jutro pójdzie na bosaka.

Minął tydzień i następne spotkanie przyjaciół rozpoczęło wspólne pałaszowanie gęsich pipek, które specjalnie na to spotkanie przygotowała Maria, na deser był cymes. *Niebo w gębie* – skomentował Bartłomiej. Wszystkim smakowało i po kilku kurtuazyjnych pochwałach Maria promieniowała. Kazimierz nabił fajeczkę i w miłym nastroju otoczony kłębami fajkowego dymu, podjął opowieść o żeglowaniu i sterowaniu.

– W następnym rejsie, kiedy Hans został oddany morzu, zapanowała wśród załogi malaria. Wszyscy oficerowie i pół załogi leżeli złożeni chorobą. Kapitan, który chwalił mnie za szybkie postępy w nauce sterowania, powierzył mi jeszcze, zastępowanie oficera. Byłem sternikiem i oficerem zarazem. Sterowanie szło mi dobrze. Kłopot miałem z żaglami, których ilość i skomplikowanie było nie do opanowania. Aliści przebywaliśmy akurat w porcie na Malajach, kiedy niedaleko nas zacumował statek o nazwie Otago. Schipchendler przyniósł wiadomość, że na Otago też pływa jakiś Polak. Spotkać rodaka na antypodach to dopiero gratka. A do tego nadal miałem problem z żaglami i okazja do pogadania wyśmienita. Ubrałem mundur galowy i wybrałem się na Otago. Po wejściu na pokład, zapytałem o Polaka. Wskazali mi kajutę, a była to kajuta kapitana. Trochę stropiłem się, jednak na odwrót było za późno. Głęboki wdech. Zapukałem. Otworzył drzwi. Jego wyraz twarzy zachęcił mnie do powiedzenia kim jestem i w jakiej sprawie przychodzę. *Konrad Korzeniowski - witam i zapraszam*. Serdecznie mnie wyściskał. Powspominaliśmy ojczyste strony. On z Drohobycza ja z Buczacza. Sam środek Polski. Usiedliśmy ze szklaneczkami rumu Jamajka. Opowiadał o ustawianiu żagli i żeglowaniu. Najbardziej zaciekawiło mnie opowiadanie o sterowaniu prędkością statku. Opowiadał jak rozpędzać statek oraz jak utrzymać prędkość, gdy słabnie wiatr. Statek jest duży i ciężki, aby go rozpędzić potrzeba trochę czasu. Od wydania rozkazu postawienia dodatkowych żagli do wykonania rozkazu mija czas, w którym wachta wstanie z koja, ubierze się, dostanie się na reje. Dlatego wydając rozkaz postawienia żagli, trzeba postawić jeden żagiel więcej, a po jakimś czasie kazać go zrzucić. Dodatkowy żagiel zrekompensuje opóźnienie powstające między wydaniem rozkazu, a wykonaniem go przez wachtę. Takie działania dla rekompensaty opóźnień, wynikających z inercji, wypróbowałem wielokrotnie, w późniejszych rejsach ratowały mnie nieraz z opresji tak na morzu, jak w życiu.

Długo jeszcze słuchałem opowiadań o jego przygodach na morzach południowych. Pięknie opowiadał o zmaganiu z losem i z przeznaczeniem. Kiedy się żegnaliśmy, dostrzegłem jak przez jego twarz, przebiegła jakby smuga cienia. Wróciłem na statek i przez jakiś czas pewna myśl nie dawała mi spokoju. Szkoda, że nikt nie spisze takich opowiadań. Książki z historiami o zmaganiu się z losem i przeznaczeniem są zawsze aktualne, można je

czytać w każdej epoce. Nasze praprawnuki mogłyby je czytać, a nawet w Krakowie zrobić festiwal Conrada, zapraszając pisarzy tego formatu co Korzeniowski.

- Drogi Kazimierzu znowu wpadasz w prorocze wizje. Muszę lecieć, bo na bazarze zamkną mi stragan z szyjkami gęsimi, bardzo chciał bym przyrządzić sobie na jutro gęsie pipki według przepisu Marii.

I poszedł.

Następne spotkanie przyjaciół rozpoczęło się w niezbyt przyjemnej atmosferze. Akurat skończył się mecz piłki nożnej, który wygrała drużyna z katolickiej parafii, gdzie grał Kazimierz, a drużyna z parafii, w której grał Bartłomiej po raz kolejny przegrała. Po meczu Pastorowa zorganizowała spotkanie w ogrodzie parafialnym, gdzie zawodnicy obu drużyn i część kibiców racząc się lemoniadą i szarlotką, jeszcze raz przeżywali akcje z meczu zakończonego przed chwilą. Ta kolejna z rzędu porażka wprowadziła Bartłomieja w kiepski nastrój. Siedział markotny i do nikogo się nie odzywał. Wspaniały nastrój rozentuzjazmowanego Kazimierza jeszcze bardziej go drażnił. Kazimierz widząc zły nastrój przyjaciela, klepnął go po plecach i zapytał, czy smakuje mu szarlotka pastorowej. Bartłomiej spojrzał z pode łba przyjacielowi prosto w oczy i zapytał: *dlaczego wy zawsze wygrywacie?*

Kazimierz czując powagę sytuacji zmienił kpiarski ton i odpowiedział:

- Ponieważ po każdym meczu spotykamy się i rozmawiamy jak sterować grą, żeby wygrać następny mecz.

Ta prosta, ale jakże zaskakująca myśl wprowadziła Bartłomieja w zadumę.

- No dobrze, ale jak na to wpadliście, żeby piłkę, która jest zabawą, grą i rozrywką powiązać z myśleniem?
- Stare czasy. Kiedy pływałem na latającym holendrze, jak zapewne pamiętasz, w portach Formozy rozgrywaliśmy mecze z tamecznymi Chińczykami. Grali oni w dziwną odmianę piłki nożnej. Jako piłki używali worka na bycze jądra wypełnionego skrawkami skóry. A ponieważ byli od nas niżsi i lżejsi swoją zwrotnością i szybkością ogrywali nas niemiłosiernie. Po kolejnej porażce kiedy w kubryku topiliśmy naszą sromotę w rumie, wstał wielki Hans sternik naszej fregaty i tak do nas przemówił:
  - Kiedy płyniemy po otwartym morzu, wtedy oddaję ster w ręce Kaza i on trzymając oburącz koło sterowe, zapatrzony w horyzont z głową w obłokach płynie hen przed siebie. Kiedy jednak mam wprowadzić okręt do portu, wtedy muszę wpierw przeanalizować wszystkie szczegóły i warunki w porcie, przemyśleć każdy manewr, żeby dotrzeć do celu, wygrać grę z losem, zakończyć podróż pomyślnie. Myślę, że w grze z Chinolami, od których nigdy nie będziemy szybsi i zwinniejsi, musimy postępować podobnie. Niech oni biegają. My celnymi podaniami ominiemy ich dryblingi i zwody i poślemy piłkę do siatki.

Spodobał się wszystkim pomysł Hansa. Stukając kubkami o beczki starym zwyczajem marynarzy JKM, zachęcali Hansa, żeby mówił dalej.

– Najpierw musimy poznać prawa, które rządzą przemieszczaniem przedmiotów takich jak okręt czy piłka. Wiatr dmuchając w żagle wytwarza siłę, która przesuwa statek, podobnie but uderza w piłkę, a ona leci. I to wszyscy wiedzą. A teraz zaczyna się myślenie. Myślenie o sterowaniu. Musimy nauczyć się sterować lotem piłki, tak aby każde podanie odebrał nasz partner, a żadnego strzału na bramkę nie odebrał bramkarz Chinoli. Od teraz musimy wybrać - zabawa, rozrywka albo myślenie i gra z losem.
– Nie gadaj tyle. Mów, co robić.

Odezwał się bosman, który i tak z nami nie grał, od kiedy rekin odgryzł mu nogę, gdy wskoczył do morza ratować syrenę, bo podobno nie umiała pływać.

– Dzisiaj już nic nie mów. To jest za mądre na taką ilość wypitego rumu. Jutro jak wydam obiad, posprzątam kambuz, usiądziemy w kubryku i opowiesz szczegóły, powiedział kucharz kapitan naszej drużyny.

Tak zrobili, i kiedy następnego dnia zasiedli w kubryku, sternik Hans przemówił:

– Drodzy moi. Jak już wczoraj mówiłem nasza przewaga w grze z Chinolami musi polegać na perfekcyjnych podaniach. Koniec z zabawą i rozrywką bierzemy się do roboty. But uderza w piłkę przekazując jej energię. Siła uderzenia ma kierunek, zwrot i moc. Kierunek uderzenia musi być taki aby piłka trafiła pod nogi partnera. Jeżeli partner jest przed nami, wtedy kopiemy palcami, jeżeli za nami to piętą. Siła uderzenia nie może być za duża, tylko taka, aby partner opanował piłkę. Nie może być za mała, żeby żaden Chinol nie zdążył zabrać piłki. Zatem, sterując piłką w czasie podania myślimy o tych trzech elementach uderzenia: kierunku, zwrocie, sile. Myśleć będziemy na początku, na treningach, później gdy dojdziemy do wprawy będziemy grać z nawyku. Natomiast przy „podawaniu" do bramki przeciwnika musimy przyjąć odwrotny sposób postępowania. Kierunek uderzenia do bramki, ale jak najdalej od bramkarza, żeby nie mógł jej dosięgnąć. Siła uderzenia tak duża, żeby nie mógł jej zatrzymać.

Wtedy nie wytrzymałem i krzyknąłem.

– To ja już wiem!

Wszyscy spojrzeli na mnie.

– Co ty po chińsku gadasz Kaz? Mów po ludzku, o co ci chodzi? Zapytał bosman.

O rety, chyba krzyknąłem po polsku.

– To proste. Już rozumiem, jaka jest zasada strzelania goli. Tak jak strzelanie do dżonek piratów. Trzeba wycelować w środek burty, załadować odpowiednią ilość prochu i w odpowiednim momencie od-palić. 1:0 dla nas. Albo jak taranowanie dżonek. Trzeba z jak największą siłą walnąć w śródokręcie i 2:0 dla nas.
– Ot, poniosło młodszego sternika, który jeszcze nigdy sam nie trafił z armaty i nie staranował dżonki stojąc za sterem.

Źródło: Internet

Zaczerwieniłem się lekko na uwagę Hansa, ale chyba nikt nie zauważył.

– To nie takie proste trafić dżonkę, Kaz. To mistrzostwo w sterowaniu, do którego dochodzisz przez wielokrotne próby, myśląc o zasadach sterowania i kierując się intuicją.
– No, ale z piłką to łatwizna. Najpierw wyznaczam kierunek do partnera, potem szacuje prędkość z jaką piłka dotrzeć do niego dotrzeć i tak uderzam, żeby tylko partner ją przyjął.
– Brawo – powiedział kucharz. Chyba będzie z niego sternik. Na cześć naszego młodszego sternika dzisiaj na kolację jajecznica po chińsku.

Gdzieś z kąta dał się słyszeć jęk. Ja też nie przepadałem za jajecznicą ze zbuków.

ZESPÓŁ SZKÓŁ ELEKTRYCZNO-ELEKTRONICZNYCH
im. prof. Maksymiliana Tytusa Hubera w Szczecinie

ZSEE/TME © 2016