

STANISŁAW KUBIT

Katedra Automatykacji
Procesów Przemysłowych

TARCIE COULOMBA W URZĄDZENIACH AUTOMATYKI

Streszczenie. W artykule podano klasyfikację poszczególnych rodzajów tarcia. Omówiono istotę tarcia wewnętrznego i zewnętrznego. Podane zostały prawa, rządzące tarcie ślizgowym, wiertnym i tocznym. Wymieniono najważniejsze miejsca występowania tarcia w urządzeniach automatyki i sposoby zmniejszania jego wpływu. Podano charakterystyki tarcia suchego, matematyczny ich zapis i sposoby modelowania na maszynie analogowej.

1. Wstęp

Jednym z najczęściej spotykanych zjawisk fizycznych jest zjawisko tarcia. Bardzo długo obowiązywał pogląd Arystotelesa, że każdy ruch wymaga siły działającej. Charakter tarcia był więc źle rozumiany. Dopiero pierwsza zasada bezwładności, sformułowana przez Galileusza pozwoliła inaczej spojrzeć na istotę tarcia. Pierwsze prawa dotyczące tarcia zostały sformułowane przez francuskiego fizyka Coulomba (1736-1806). Tarcie występuje również w urządzeniach automatyki i posiada duży wpływ na jakość ich działania. Rozróżnia się dwa zasadnicze rodzaje tarcia: tarcie wewnętrzne i tarcie zewnętrzne.

2. Tarcie wewnętrzne

Tarcie wewnętrzne związane jest zawsze z wzajemnym ruchem cząsteczek danego ciała względem siebie. Jest to nieodwracalna przemiana energii mechanicznej w ciepłą i posiada charakter kinematyczny. Nie istnieje tarcie wewnętrzne statyczne. Przy sprężystej deformacji ciał stałych tarcie wewnętrzne spowodowane jest histerzą sprężystą i niekwazystatycznym przebiegiem deformacji. Bezpośrednią przyczyną histerzy są odkształcenia trwałe, powstałe przy przemieszczeniu się cząsteczek danego ciała względem siebie.

3. Tarcie zewnętrzne

Tarcie zewnętrzne dzielimy na tarcie statyczne i kinematyczne. Tarcie statyczne występuje, jeśli na ciało stykające się z podłożem działa zewnętrzna siła lub moment, niezadane do wywołania ruchu ciała. W war-

stwach powierzchniowych obu ciał występują wówczas przesunięcia rzędu 10^{-6} (m) oraz odkształcenia sprężyste o wielkości proporcjonalnej do przyłożonej siły lub momentu.

Tarcie kinematyczne to nieodwracalna przemiana energii mechanicznej w ciepłą w procesie deformacji stykających się i poruszających względem siebie ciał stałych, obejmująca warstewkę powierzchniową ciał o grubości dla powierzchni gładkich rzędu 10^{-6} (m). Niekiedy grubość tej warstewki może być znaczna i wtedy mogą się zatrzeć granice pomiędzy tarcie zewnętrzny a wewnętrznym. Tarcie zewnętrzne może być suchym, jeżeli powierzchnie trące są zupełnie czyste lub pokryte warstewką smaru o grubości jednej molekuly. Tarcie zewnętrzne będzie półsuchym, gdy grubość smaru między powierzchniami ma grubość od jednej molekuly do 10^{-6} (m). Przy większych grubościach smaru tarcie nosi nazwę tarcia mokrego. Tarcie zewnętrzne możemy podzielić ze względu na rodzaj wzajemnego ruchu ciał trących na tarcie ślizgowe, wiertne i toczne.

4. Tarcie ślizgowe

Ślizganiem nazywany ruch, w którym części powierzchni dwóch ciał w miejscu zetknięcia poruszają się wzajemnie ruchem postępowym. Dla tarcia ślizgowego suchego lub półsuchego obowiązują odkryte na drodze empirycznej prawa Coulomba:

- a) Siła tarcia ślizgowego, działająca na ciało ma kierunek prędkości tego ciała względem drugiego, z którym ono się styka i zwrot przeciwny do tej prędkości
- b) siła ta nie zależy od prędkości
- c) siła tarcia jest wprost proporcjonalna do nacisku
- d) siła tarcia nie zależy od powierzchni zetknięcia się ciał.

Współczynnik tarcia zdefiniowany został jako:

$$f = \frac{F_t}{F_N},$$

gdzie:

F_t - siła tarcia

F_N - siła nacisku.

Współczynnik ten zależy od rodzaju ciał trących, a także od jakości ich powierzchni. Dla dwóch materiałów w próżni współczynnik tarcia jest około 100 razy większy niżeli dla tych samych materiałów umieszczonych w powietrzu. Rozróżniamy współczynnik tarcia ślizgowego kinematycznego f_{ks} od współczynnika tarcia ślizgowego statycznego f_{ss} . Z reguły w atmosferze powietrza $f_{ss} > f_{ks}$. W próżni natomiast, jak podaje Feynman w książce

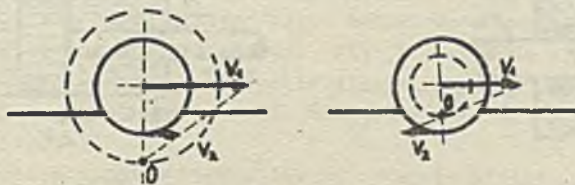
"Lectures on Physic" żadnej różnicy nie można dostrzec w wielkościach tych współczynników.

5. Tarcie wiertne

Wierceniem nazywamy ruch, w którym części powierzchni dwóch ciał w miejscu ich zetknięcia poruszają się wzajemnie ruchem obrotowym dookoła osi obrotu, prostopadłej do tej powierzchni. Prawa Coulomba w stałej rozciągłości odnoszą się również do tarcia wiertnego z tym, że operujemy momentami, a nie siłami tarcia wiertnego. Do podanych poprzednio czterech praw dochodzi prawo płate dotyczące tarcia wiertnego, a mianowicie: moment tarcia wiertnego jest wprost proporcjonalny do średnicy trących powierzchni.

6. Tarcie toczne

Toczeniem nazywamy ruch, w którym części powierzchni dwóch ciał w miejscu zetknięcia poruszają się wzajemnie ruchem obrotowym względem chwilowej osi obrotu, stycznej do ich powierzchni. Walce toczący się po podłożu toczy się zawsze stykając się z podłożem wzdłuż wielu prostych, tworzących powierzchnię zetknięcia. Częstka podłoża, będąca w małej odległości od walca, lub dotykająca walec może mieć prędkość różną od zera względem cząstek położonych dalej. Jeżeli zwrot rzutu tej prędkości na kierunku prędkości osi walca jest zgodny ze zwrotem tej prędkości, to poślizg będzie dodatni, jeżeli przeciwny, to poślizg będzie ujemny. Powierzchnię zetknięcia można podzielić na trzy strefy: strefę przyczepności i dwie skrajne strefy poślizgu. Jeżeli najniższa tworząca leży w strefie przyczepności, to jej prędkość jest taka jak prędkość stykających się z nią cząstek walca. W związku z tym, w zależności od poślizgu zmienia się położenie chwilowej osi obrotu. Przy poślizgu dodatnim oś obrotu przemieszcza się w dół, przy poślizgu ujemnym w górę.



Rys. 1

Jak wynika z rysunku, poślizg dodatni zwiększa, a ujemny zmniejsza drogę przebytą przez walec podczas jednego obrotu. Przeważnie powierzchnia zetknięcia jest mała i występują duże naciski. Na skutek histerezy położony za walcem powstaje reszkowe odkształcenie. Pole zetknięcia przed najniższą tworzącą jest większe niż za nią i w związku z tym nacisk na

przednią część wałka jest większy aniżeli na tylną. Powstaje więc moment reakcji podłoża, przeciwdziałający ruchowi. Tym tłumaczy się zatrzymywanie swobodnie toczących się wałków. Moment tarcia tcznego, to suma momentów, którymi jedno ciało oddziałuje na drugie w zjawisku toczenia. Moment ten ma kierunek prędkości kątowej, a zwrot przeciwny, nie zależy od prędkości i jest wprost proporcjonalny do nacisku. Współczynnik tarcia kinetycznego zdefiniowany jest jako

$$f_t = \frac{M_t}{F_N}, \quad (2)$$

gdzie:

M_t - moment tarcia

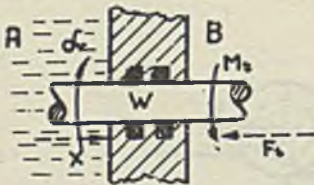
F_N - siła nacisku.

7. Tarcie w urządzeniach automatyki

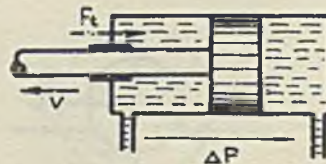
Zjawisko tarcia zewnętrznego dość często występuje w urządzeniach automatyki we wszystkich swych rodzajach. Spotkać go można w organach pomiarowych, regulatorach, organach wykonawczych, wskaźnikach itp. Wielkość siły lub momentu tarcia, a także miejsca jego występowania bardzo silnie rzutuje na dobroć całego układu regulacji.

Tarcie zewnętrzne występuje:

- a) przy przenoszeniu momentu siły, kąta obrotu lub przesunięcia z jednej przestrzeni do drugiej oddzielonych stałą, separującą przegrodą (rys. 2).

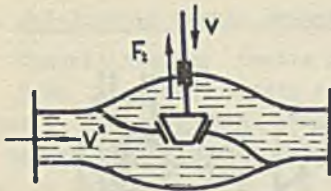


rys. 2

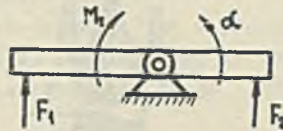


Rys. 3

Przegroda P uniemożliwia przedostanie się medium z przestrzeni A do B, jednakże w miejscu zetknięcia wałka W z przegrodą P powstaje moment lub siła tarcia zewnętrznego (przeważnie będzie to tarcie półsuche). Tarcie tego typu spotyka się w niektórych przetwornikach (przetwornik poziomu firmy Bristol's), w siłownikach hydraulicznych i nastawnikach przepływu (rys. 3 i 4).



Rys. 4

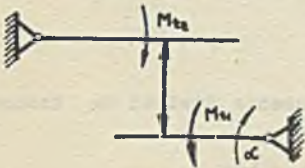


Rys. 5

b) w osiach obrotu układów dźwigniowych

Tarcie tego typu występuje w przetwornikach lub regulatorach, pracujących na zasadzie porównania momentów lub przemieszczeń występuje w ustawnikach pozycyjnych siłowników i ich układach korbowych, w rejestratorach i wskaźnikach.

c) przy przenoszeniu siły lub przesunięcia przy pomocy popychaczy z jednego elementu na element inny. Tarcie tego typu spotkać można głównie w przetwornikach wielodźwigniowych (rys. 6) w punktach styku popychaczy z dźwigniami.



Rys. 6

d) w innych punktach urządzeń nie objętych powyższą klasyfikacją. Należy podkreślić, że siły i momenty tarcia zewnętrzne, występujące w regulatorach i przetwornikach winny być rzędu ułamka procent sił i momentów, wytwarzanych przez dany siłownik.

8. Sposoby zmniejszania wpływu tarcia w urządzeniach automatyki

W celu zmniejszenia lub praktycznie zupełnego wyeliminowania tarcia przy przenoszeniu wielkości charakterystycznych z jednej przestrzeni do drugiej stosuje się odpowiedniego typu beztarciowe wyprowadzenie. Przy przenoszeniu siły lub momentu stosuje się mieszki lub membrany sprężyste. Na rys. 7a pokazano wyprowadzenie siły w mierniku przetwornika firmy "Samson", na rys. 7b - wyprowadzenie momentu w mierniku przetwornika firmy "Askania" (rys. 7).

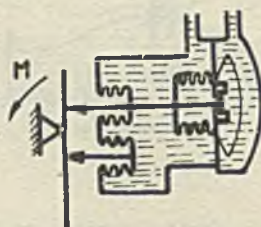
Przy przenoszeniu przesunięcia lub kąta obrotu stosuje się wyprowadzenia magnetyczne lub w postaci rurki torsyjnej (rys. 9).

Tego typu wyprowadzenie kąta obrotu z miernika w postaci celu Bartona, spotykane jest m.in. w przetwornikach firmy Hartmann-Braun.

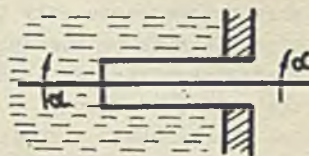
Podane rozwiązanie spotyka się głównie w organach pomiarowych. W siłownikach ze względu na dopuszczalność istnienia dość dużych sił tarcia tego rodzaju rozwiązania raczej się nie stosuje. W celu wyeliminowania tarcia,



Rys. 7

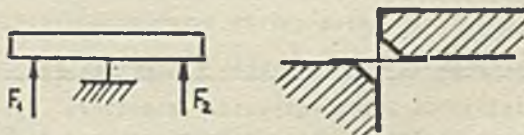


Rys. 8



Rys. 9

występującego w osiach obrotu stosuje się zawieszania dźwigni na taśmach sprężystych lub taśmach krzyżowych (rys. 10).



Rys. 10

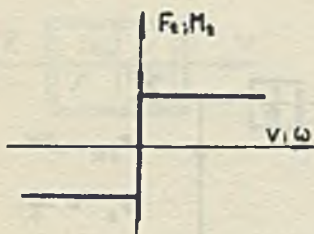
Rozwiązania tego typu spotyka się powszechnie w regulatorach i przetwornikach. Zawieszania na łożyskach kulkowych spotyka się jedynie w układach, których dźwignie wykonują dość duże ruchy (przetworniki pomiarowe firmy Askania, produkowane przez ZAP Ostrów Wielkopolski).

Znaczne zmniejszenie tarcia w punktach styku poprowadzona z dźwignią uzyskuje się przez zastosowanie minimalnej powierzchni styku. Powierzchnie stykające się są utwardzane specjalną obróbką.

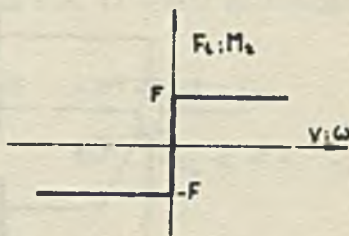
9. Modelowanie tarcia zewnętrznego (suchego lub półsuchego)

Charakterystykę tarcia suchego przedstawia rys. 11.

Siła lub moment tarcia spoczynkowego (statycznego) są w praktyce większe od siły i momentu tarcia kinematycznego. Uwzględniono to na rys. 11. Z pewnym przybliżeniem charakterystykę tarcia suchego można przedstawić jak na rys. 12.



Rys. 11



Rys. 12

Matematyczny zapis tej charakterystyki będzie następujący:

$$F_t = -F \quad \text{dla} \quad v < 0$$

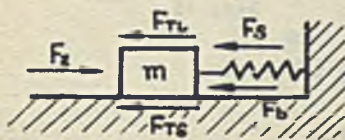
$$-F < F_t < F \quad \text{dla} \quad v = 0$$

$$F_t = F \quad \text{dla} \quad v > 0.$$

Należy zwrócić uwagę, iż w odróżnieniu od charakterystyki przekątnikowej rzędna charakterystyki tarcia suchego dla odciętej równej zero może przybierać nieskończenie wiele wartości.

Wielkość tej rzędnej zależy od zewnętrznego wymuszenia, działającego na układ, gdy $v = 0$.

Rozpatrzmy układ przedstawiony na rys. 13.



Rys. 13

Podczas ślizgania się masy po podłożu, przy założeniu istnienia tarcia suchego, tarcia lepkościowego i sprężystości można utworzyć następujący bilans sił:

$$F_z - F_b - F_{TL} - F_{TS} - F_s = 0 \quad (3)$$

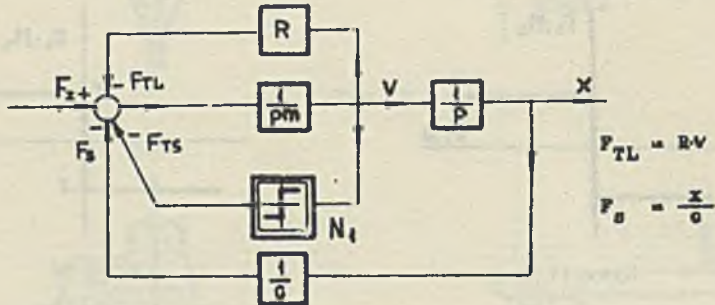
po przekształceniu:

$$F_z - F_{TS} - F_{TL} - F_s = F_b. \quad (4)$$

Równaniu (4) odpowiada następujący schemat blokowy

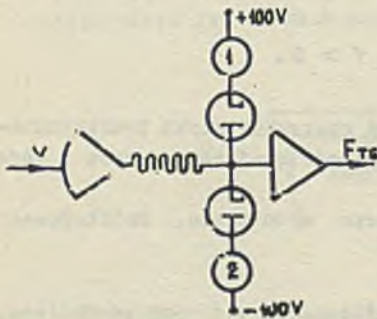
$$F_{TL} = R \cdot V$$

$$F_s = \frac{x}{o}$$

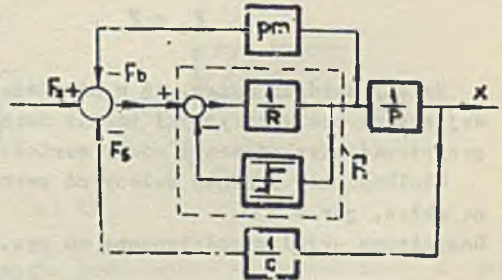


Rys. 14

W schemacie występuje element nieliniowy N_1 , który można zamocłować na maszynie analogowej, budując następujący układ (rys. 15).



Rys. 15



Rys. 16

Równanie (3) można przedstawić również w innej postaci:

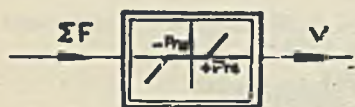
$$F_s - V_s - F_b = F_{TL} + F_{TS} \quad (5)$$

co pozwoli utworzyć następujący schemat blokowy układu (rys. 16) oznaczając

$$F_{TS} + F_{TL} = F_z - F_s - F_b = F$$

fragment A można przedstawić w innej formie (rys. 17).

Matematyczny zapis charakterystyki przedstawionej na rys. 17 będzie następujący:



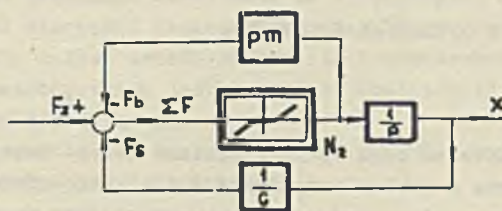
Rys. 17

$$v = \frac{\Sigma F + F_{Ts}}{R} \quad \text{dla} \quad F < -F_{Ts}$$

$$v = 0 \quad \text{dla} \quad -F_{Ts} < F < F_{Ts}$$

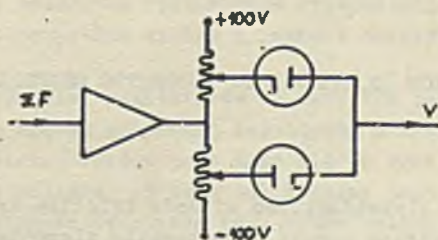
$$v = \frac{\Sigma F - F_{Ts}}{R} \quad \text{dla} \quad F \geq F_{Ts}$$

Schemat blokowy układu będzie miał więc postać:



Rys. 18

Występujący element nieliniowy N2 można zmodelować na maszynie analogowej korzystając z następującego schematu:



Rys. 19

Element nieliniowy N2 wydaje się być łatwiejszym do zamodelowania, aniżeli element N1, ale układ z elementem N2 posiada człon różniczkujący, którego istnienie w procesie modelowania nie jest zbyt korzystne.

LITERATURA

- [1] DieriaGIN E.F. - Co to jest tarcie? W-wa 1956 r.
- [2] Wroński A.S. - Tarcie. Problemy nr 9, 1969 r.
- [3] Fifer S. - Analogue Computation, New York 1961 r.

Rękopis złożono w Redakcji w dniu 28.IV.1970 r.

КУЛОМОВОЕ ТРЕНИЕ В ЭЛЕМЕНТАХ АВТОМАТИКИ

Резюме

В статье перечислены виды трения. Указаны места выступления трения в приборах автоматики и методы устранения его влияния. Описаны характеристики сухого трения и способы аналогового моделирования узлов элементов автоматики, в которых выступает сухое трение.

COULOMB'S FRICTION IN SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

Summary

In the paper classification of mode friction is presented. The points in which the friction occurs in automatic elements are showed.

The ways on which the influence of friction can be omitted are also given.

The characteristics of the solid friction and methods of their analogue modelling are described.