

2. Jak skręcają pojazdy?

Jan Czyżewski

2.1 Wstęp

Odkąd człowiek zaczął przemieszczać się z wykorzystaniem środków transportu posiadających koła, pojawiły się problemy związane ze skręcaniem takimi pojazdami.

2.2 Jednoślady

O ile w pojazdach jednokołowych (np. monocykl) skręt jest dosyć prosty i do jego wykonania wystarczy odpowiednie balansowanie ciałem przez kierowcę, to im więcej kół ma pojazd, tym robi się trudniej. Sprawa jest jeszcze prostsza w przypadku rowerów i motocykli, które mają dwa koła ustawione w osi pojazdu jedno za drugim. Aby skręcić wystarczy obrócić odpowiednio przednie koło za pomocą kierownicy lub wychylić nieco za pomocą ruchu ciała kierowcy cały pojazd, co przyniesie podobny efekt.

2.3 Pojazdy o większej ilości kół

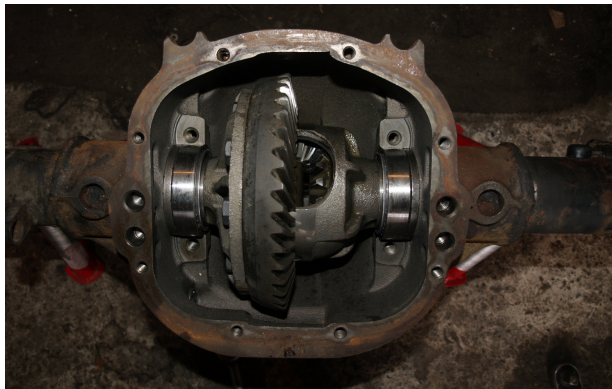
Wyobraźmy sobie teraz pojazd z dwoma kołami ustawionymi obok siebie (np. wózek). Dopóki taki pojazd porusza się na wprost, nie dzieje się nic szczególnego. Oba koła pokonują taką samą drogę, a więc mają tę samą prędkość obrotową (przy założeniu, że koła są tej samej

średnicy). Sytuacja zmienia się, kiedy chcemy skręcić, czyli jedziemy po łuku. Gdy wykonujemy skręt, jedno z kół ma do pokonania większą drogę niż drugie. W tej sytuacji zmienia się również prędkość obrotowa kół. Jeśli koła nie są ze sobą połączone za pomocą sztywnej osi (mogą się poruszać niezależnie od siebie), nie powoduje to żadnych kłopotów. Wyobraźmy sobie teraz jednak, że koła złączymy ze sobą na stałe. Rozwiązanie takie działałoby dobrze podczas jazdy na wprost. Co jednak działałoby się na zakręcie? Tutaj byłoby już znacznie gorzej. Jak wspomnieliśmy wcześniej, koła dążyłyby do poruszania się z różnymi prędkościami obrotowymi, na co jednak nie pozwalałaby łącząca je oś. W samej osi powstałyby naprężenia, mogące doprowadzić do jej pęknięcia. Przy zbyt słabej konstrukcji osi, mogłoby się tak wydarzyć. Jeśli oś będzie odpowiednio wytrzymała, efekty w pierwszej kolejności odczuje osoba pchająca wózek i próbująca nim skręcić. Wózek będzie stawiał duży opór, tym większy im ostrzej będziemy próbowali skręcić. Nie będzie to zbyt odczuwalne na nawierzchni o słabej przyczepności (piasek, mokra trawa itd.), ponieważ koła w pewnym stopniu zaczną się ślizgać, równoważąc różnicę obrotów, które powinny wykonać. Inaczej sytuacja będzie wyglądała na nawierzchni o dobrej przyczepności (np. suchy asfalt), gdzie do skrętu należy użyć dużej siły, ponieważ trudno będzie wywołać poślizg. Występowanie poślizgu niszczy oczywiście powierzchnię styku kół z podłożem, a poza tym może prowadzić do trudności w skierowaniu pojazdu tam, gdzie sobie tego życzymy. Dlatego w pojazdach pozbawionych napędu nie łączy się ze sobą kół na sztywno.

2.4 Przeniesienie mocy na koła

Co jednak, jeśli chcielibyśmy wyposażyć wózek w napęd i mamy do dyspozycji tylko jeden silnik? Najlepiej, aby napęd był przenoszony na oba koła. Najprostszym rozwiązaniem, byłoby połączenie kół za pomocą sztywnej osi i napędzanie tej osi z użyciem silnika. Pojawia się jednak wtedy, wspomniane przed chwilą problemy. Dlatego w pojazdach używany jest **mechanizm różnicowy**. Urządzenie to składa się z obudowy i zamkniętego w niej zespołu kół zębatach. Napęd z silnika przenoszony jest na obudowę mechanizmu różnicowego. Na niewielkiej osi, umieszczonej wewnątrz obudowy, znajdują się koła zębata (najczęściej dwa), które zwane są satelitami. Satelity zazębiają się z dwoma kolejnymi kołami, zwanymi koronkowymi. Każde z kół koronkowych jest połączone z jednym kołem pojazdu za pomocą półosi. Taka konstrukcja mechanizmu różnicowego pozwala na przekazywanie napędu

na oba koła pojazdu, jednak koła nie są połączone na sztywno. Oznacza to, że na zakrętach koła mogą obracać się z różnymi prędkościami obrotowymi, dzięki czemu możliwe jest uniknięcie powstawania naprężeń i poślizgu. Jednocześnie koła są cały czas napędzane. Rozwiązanie to znamy powszechnie z samochodów. Posiadają one wprawdzie co najmniej dwie osie, ale w czasie skrętu ich osie zachowują się podobnie do rozważanego wcześniej wózka.



Rysunek 2.1: Samochodowy mechanizm różnicowy wraz z przekładnią główną



Rysunek 2.2: Podstawowe elementy klasycznego mechanizmu różnicowego: koła koronkowe oraz satelity wraz z ich osią

Skupmy się na razie na samochodach z napędem na tylko jedną oś. Mechanizm różnicowy ma oczywiście zalety, które już omówiliśmy, posiada jednak również wady. Jedną z nich jest to, że zawsze dzieli w proporcji 1:1 siłę napędową przekazywaną do każdego z kół. Mecha-

nizmy tego typu nazywamy klasycznymi lub otwartymi. Co to oznacza w praktyce? Posłużmy się przykładem.

■ **Przykład 2.1** Samochód zatrzymuje się w miejscu. Jedno z kół jego osi napędowej stoi na asfalcie, a drugie na lodzie. Jak wiemy, lód jest śliski, a co za tym idzie zapewnia bardzo słabą przyczepność. Koło stojące na lodzie bardzo łatwo zacznie się więc ślizgać. Siła napędowa będzie bardzo mała, niewystarczająca do poruszenia samochodu. Co jednak z drugim kołem, tym na asfalcie? Przecież tam przyczepność jest dobra, a koło nie zacznie się ślizgać. Tak, ale jak już wyjaśniliśmy, mechanizm różnicowy powoduje zawsze rozdział siły napędowej po równo pomiędzy koła. Siła napędowa koła na asfalcie będzie więc tak samo mała, jak tego na lodzie. W praktyce, koło na lodzie będzie się obracać, podczas gdy drugie najpewniej będzie stać w miejscu. Koniecznym będzie znalezienie chętnych, którzy pomogą kierowcy w wypchnięciu samochodu z pułapki. W tej sytuacji byłoby lepiej, gdyby koła były jednak połączone ze sobą na sztywno. Wtedy do ruszenia z miejsca wystarczyłaby przyczepność do podłoża tylko jednego z kół.

W zwykłych samochodach, używanych najczęściej na drogach o dobrej nawierzchni, taki problem nie jest zbyt dotkliwy. Kłopoty pojawiają się zazwyczaj tylko w czasie ostrej zimy, która w naszym kraju trwa coraz krócej lub gdy kierowca zapędzi się, np. w głęboki piasek. ■

2.5 Pojazdy terenowe

Zupełnie inaczej sprawa wygląda w przypadku pojazdów terenowych, które dużą część swojego życia spędzają pokonując przeszkody w terenie. Opisany wcześniej najprostszy mechanizm różnicowy (bez żadnych systemów blokowania) jest nazywany mechanizmem klasycznym lub otwartym. W terenie mechanizm różnicowy przeszkadza, ale jest niezbędny, gdy zechcemy poruszać się po normalnej drodze. Jak więc poradzić sobie z tym problemem? Najstarszym z rozwiązań jest zastosowanie **blokady mechanizmu różnicowego**. W najprostszej formie blokada taka działa w sposób zero–jedynekowy. Gdy jest wyłączona, mechanizm różnicowy działa normalnie. Jeśli jednak uruchomimy blokadę, koła łączone są ze sobą na sztywno. Umożliwia to łatwiejsze poruszanie się w terenie i jednocześnie normalną jazdę po drodze z dobrą nawierzchnią. Blokada ta jest uruchamiana przez kierowcę i zazwyczaj do jej włączenia konieczne jest zatrzymanie samochodu. Nie jest to więc rozwiązanie do końca wygodne. Wobec tego pojawił się szereg bardziej zaawansowanych konstrukcji mechanizmów

różnicowych. Pierwszą z nich są mechanizmy z blokadą samoczynną działające podobnie do tych z blokadą uruchamianą ręcznie (tzn. działające zero–jedynkowo), ale aktywują się one samoczynnie, czyli bez udziału kierowcy. Zazwyczaj dzieje się to mechanicznie - bez potrzeby stosowania elektronicznych układów sterowania. Bardziej wyrafinowane w działaniu są mechanizmy różnicowe, które potrafią dzielić siłę napędową przekazywaną do kół w różnych proporcjach.

Jednym z najlepszych, ale też najbardziej skomplikowanych i najdroższych rozwiązań tego typu jest mechanizm typu TorSen. Jest on zbudowany z użyciem przekładni ślimakowych, które są zdolne do płynnej pracy lub blokowania się, co zależy od warunków obciążenia. W samochodzie mechanizm różnicowy z takimi przekładniami działa następująco: kiedy każde z kół ma dobrą przyczepność, mechanizm różnicowy zachowuje się jak mechanizm klasyczny. Kiedy jednak jedno z kół wpadnie w poślizg, przekładnie blokują się, tym samym powodując dołączenie napędu drugiego z kół. Konstrukcję tę wykorzystuje się stosunkowo rzadko, głównie ze względu na wspomnianą wysoką cenę.

Innym rozwiązaniem są mechanizmy ze sprzęgłami ciernymi, które przeciwdziałając obracaniu się kół niezależnie od siebie. Siła, z jaką działają te sprzęgła, może być stała lub regulowana w zależności od warunków jazdy. Pod potoczną nazwą „szpera” najczęściej kryją się właśnie tego typu mechanizmy różnicowe.



Rysunek 2.3: Zmodyfikowany samochód dostawczy Żuk wyposażony w napęd 6x6 i zbudowany na Politechnice Lubelskiej

Kolejnym ciekawym rozwiązaniem są mechanizmy różnicowe ze sprzęgłem lepkościowym. W rozwiązaniu tym oba koła pojazdu są

połączone za pomocą sprzęgła wielotarczowego, które zanurzone jest w specjalnym oleju (zazwyczaj silikonowym). Kiedy koła obracają się ze zbliżoną prędkością nie dzieje się nic nadzwyczajnego. Jednak gdy jedno z kół zaczyna się poruszać znacznie szybciej (w czasie poślizgu), olej szybko nagrzewa się na skutek wzajemnego tarcia elementów i robi się bardzo lepki. Ten wzrost lepkości pozwala na rozpoczęcie działania sprzęgła i połączenie ze sobą kół. Mechanizmy takie działają w płynny, łagodny sposób, aczkolwiek uruchamiają się z pewnym opóźnieniem.



Rysunek 2.4: Terenowy samochód ciężarowy Star 244 w akcji

Istnieje też wiele innych odmian mechanizmów różnicowych o ograniczonym poślizgu, np. mechanizmy z oporem hydraulicznym stosowane czasami w maszynach budowlanych. W wielu współczesnych samochodach wykorzystuje się rozwiązanie, gdzie do przyhamowywania koła, które straciło przyczepność podczas ruszania, używany jest hamulec tego koła. Wynika to faktu, że praktycznie wszystkie te pojazdy posiadają układy ABS (ang. anti-lock braking system, czyli układ zapobiegający blokowaniu się kół w czasie hamowania) i ESP (ang. Electronic Stability Program, czyli system stabilizacji pojazdu w razie poślizgu), które mają możliwość indywidualnego sterowania hamulcami każdego z kół. Wprowadzanie elektronicznego asystenta ruszania

wymaga głównie rozbudowy oprogramowania w sterownikach, które odpowiadają za działanie wspomnianych systemów. Rozwiązanie to jest tanie i dosyć skuteczne, w niesprzyjających warunkach przyspiesza jednak zużycie hamulców.

2.6 Pojazdy sportowe

Koniecznym należy wspomnieć, że efekt połączonych ze sobą na sztywno kół napędowych, niebezpieczny i niepożądany w zwykłej eksploatacji samochodu, znajduje zastosowanie w sporcie. Układ pozwalający łatwo wywołać poślizg tylnej osi jest bardzo przydatny w jeździe w poślizgu kontrolowanym, czyli drifcie. Także w przypadku samochodów o dużej mocy zastosowanie otwartego mechanizmu różnicowego nie pozwala na skuteczne wykorzystanie mocy silnika. Przede wszystkim ze względu na łatwą utratę przyczepności kół, nawet na dobrej nawierzchni. Dlatego w samochodach drogowych o dużej mocy oraz konstrukcjach typowo sportowych stosuje się mechanizmy różnicowe o zwiększonym oporze, głównie ze sprzęgłami ciernymi lub TorSen. Mechanizmy te mogą być regulowane, aby jak najlepiej dostosować charakterystykę samochodu do preferencji kierowcy i warunków drogowych (lub charakterystyki np. rajdu).



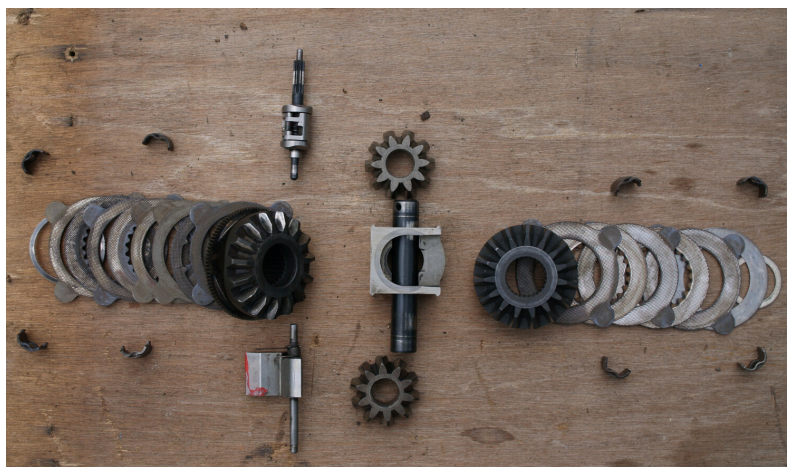
Rysunek 2.5: Tarcze cierne stosowane w mechanizmach różnicowych o zwiększonych tarciu wewnętrznym, zwanych popularnie „szperą”

2.7 Pojazdy z napędem na wiele osi

Jak na razie wspomnieliśmy o pojazdach z napędzaną tylko jedną osią. Jednak często można spotkać pojazdy z większą ilością napędzanych

osi. W lekkich samochodach terenowych jest to zazwyczaj układ 4×4 , gdzie pierwsza cyfra oznacza ogólną ilość kół w samochodzie, a druga ilość kół, które są napędzane. W ciężarówkach i cięższych pojazdach terenowych konfiguracje podwozi mogą być bardzo różne, np. 6×2 , 6×4 , 6×6 , 8×8 , 10×10 itd.

Zacznijmy na razie od układu 4×4 , ponieważ już w tym przypadku zaczynają się pewne kłopoty. Jak wcześniej wspomnieliśmy, podczas jazdy na zakręcie występuje różnica w prędkości obrotowej kół, które znajdują się na jednej osi. W samochodzie z napędem na dwie osie można rozwiązać ten problem stosując na każdej z nich mechanizm różnicowy. Teraz należy przekazać napęd z silnika na obie osie. Najprościej byłoby połączyć oba mechanizmy różnicowe ze skrzynią biegów. I tutaj znowu pojawia się problem, ponieważ podczas jazdy po zakręcie prędkość obrotowa przedniego i tylnego mechanizmu różnicowego nieco się różni, podobnie jak w przypadku kół na tej samej osi. Więc podobnie jak w przypadku kół, połączenie ze sobą mechanizmów różnicowych na sztywno będzie powodować naprężenia i problemy z poślizgiem. Sposoby radzenia sobie z tym problemem były różne. Część terenówek ma napędzaną na stałe tylko jedną oś. Druga oś jest dołączana tylko w razie potrzeby, w trudnych warunkach. Dodatkowo rozwiązanie takie zmniejsza nieco zużycie paliwa podczas jazdy po drogach, głównie ze względu na zmniejszenie oporów ruchu. Napęd może być dołączany ręcznie przez kierowcę (zazwyczaj trzeba się zatrzymać, żeby to zrobić) lub może się to dzieć samoczynnie.



Rysunek 2.6: Elementy samoczynnie blokującego się mechanizmu różnicowego

W układach samoczynnych stosuje się wiele rozwiązań, często podobnych do tych, które znajdują zastosowanie w mechanizmach osiowych. Możemy spotkać tutaj sprzęgła cierne uruchamiane mechanicznie lub ze sterowaniem elektronicznym (np. Haldex). Stosowane są również sprzęgła lepkościowe, szczególnie w przypadku pojazdów nieco rzadziej odwiedzających ciężki teren. Co jednak w sytuacji, kiedy chcemy mieć wszystkie koła napędzane przez cały czas? Tutaj konieczne jest zastosowanie międzyosiowego mechanizmu różnicowego. W przypadku samochodu ze stałym napędem 4×4 oznacza to konieczność użycia aż trzech mechanizmów różnicowych (po jednym dla każdej osi) oraz międzyosiowego. Wynika to z faktu, że na zakręcie każde z kół porusza się z nieco inną prędkością. Jednak w przypadku zastosowania trzech mechanizmów typu otwartego, powraca znany już nam problem – wystarczy, że jedno z kół wpadnie w poślizg, a samochód nie będzie już w stanie ruszyć z miejsca. Dlatego bardzo często używane są międzyosiowe mechanizmy różnicowe wyposażone w blokady lub o zwiększonym oporze wewnętrznym. Mamy tu do czynienia z tymi samymi rozwiązaniami, które są używane w mechanizmach osiowych. Występują więc blokady włączane manualnie lub samoczynnie, mechanizmy typu TorSen, mechanizmy ze sprzęgłami ciernymi w różnych odmianach, ze sprzęgłem lepkościowym itd. Największe możliwości terenowe daje samochodowi zastosowanie trzech tego typu mechanizmów. Taki pojazd jest zdolny do ruszenia z miejsca, gdy tylko jedno koło posiada wystarczającą przyczepność do podłoża. Układ ten stosuje się jednak rzadko z powodu wysokich kosztów i dużego skomplikowania konstrukcji. W prostszych rozwiązaniach, zamiast skomplikowanych mechanizmów różnicowych, można też wykorzystywać efekt przyhamowania ślizgających się kół przez elektronikę i układ hamulcowy. W pojazdach, gdzie osie napędowe są umieszczone bardzo blisko siebie (np. tylne osie napędowe w ciężarówkach 6×4) nie ma konieczności stosowania mechanizmu międzyosiowego ze względu na niewielkie różnice w prędkości obrotowej między tymi osiami. Z kolei w bardziej nowoczesnych rozwiązaniach stosuje się mechanizmy międzyosiowe ze sprzęgłami sterowanymi elektronicznie, zdolne do dzielenia siły napędowej pomiędzy osie według żądanych proporcji. Umożliwia to zmianę charakterystyki prowadzenia samochodu, zależnie od życzenia kierowcy i warunków panujących na drodze. Można więc np. przekazywać - w samochodzie 4×4 - większość mocy na koła tylne uzyskując efekt prowadzenia, jak w samochodzie z tylnym napędem.

2.8 Pojazdy specjalne

Jeszcze inaczej sytuacja wygląda w przypadku pojazdów o przynajmniej dwóch osiach, które nie posiadają kół skrętnych oraz pojazdów gaśnicowych. Pojazdy te „zmusza się” do skrętu, wykorzystując znany nam już efekt różnicy prędkości obrotowych kół podczas tego manewru. Pojazdy kołowe mają najczęściej napędzane wszystkie koła, gaśnice zaś możemy w uproszczeniu potraktować jako pojedyncze koło. Skręt można uzyskać, celowo zwalniając ruch kół (lub gaśienicy) z jednej strony pojazdu. Spowoduje to ruch pojazdu po łuku, tym ciaśniejszym im większa jest różnica prędkości obrotowych. Można to realizować na kilka sposobów: stosując sprzęgła odłączające napęd po jednej stronie, przekładnie zmniejszające prędkość obrotową oraz niezależne hamulce powodujące przyhamowanie wybranej strony pojazdu. Odpowiednie dobranie takich rozwiązań pozwala na uzyskanie dobrej kontroli nad pojazdem, od precyzyjnego wykonywania lekkich skrętów przy większych prędkościach, aż do wykonywania bardzo ciasnych zwrotów w miejscu. Oczywiście, szczególnie w przypadku gaśienic, podczas skrętu występuje poślizg względem podłoża. Dlatego podczas jazdy, np. czołgiem po utwardzonej drodze, konieczne jest stosowanie na gaśnice nakładek z gumy, które zapobiegają niszczeniu nawierzchni.



Rysunek 2.7: Zdalnie sterowany pojazd na podwoziu gaśnicowym wykorzystywany przez saperów

Ciekawie wygląda kwestia wykorzystania w takich pojazdach elektrycznego lub hydraulicznego przeniesienia napędu. W tym wypadku silnik napędza prądnicę lub pompę hydrauliczną. Koła (lub gąsienice) napędzane są wtedy przez silniki elektryczne lub hydrauliczne, niezależne dla każdej strony pojazdu. W tej konfiguracji możliwa jest płynna regulacja mocy i prędkości obrotowej silników z każdej strony, co pozwala na bardzo łatwe sterowanie pojazdem. Najciekawsza jest jednak możliwość niezależnej zmiany kierunku obrotów silników, dzięki czemu możliwe jest zawracanie pojazdu w miejscu (obracając się wokół własnej osi pionowej). Jest to niezwykle pomocne w pojazdach pracujących na budowach, gdzie często brakuje miejsca oraz w pojazdach bojowych, które muszą czasami wykonywać skomplikowane manewry.



Rysunek 2.8: Pojazd najbardziej kojarzący się z poruszaniem się na gąsienicach, czyli czołg

Inną odmianą systemu skrętu, spotykaną najczęściej w pojazdach budowlanych, jest zastosowanie łamanego podwozia. Osie są umieszczone w podwoziu na stałe, a same koła nie posiadają możliwości skrętu. Jednak przednia i tylna część pojazdu są połączone ze sobą przegubowo, z możliwością obrotu o określony kąt, co zapewnia możliwość skrętu. W takiej konfiguracji także potrzebne są mechanizmy różnicowe.



Rysunek 2.9: Załadunek ciężarówki za pomocą koparki z przegubowym podwoziem

2.9 Kolej

Bardzo ciekawie problem różnicy drogi, pokonywanej przez koła na wspólnej osi w czasie jazdy po łuku, rozwiązano na kolei. W kolejnictwie, praktycznie zawsze, koła na każdej z osi lokomotywy lub wagonu są połączone ze sobą na sztywno. Pociągi pokonują jednak łuki, czasami całkiem ciasne. Rozwiązanie problemu jest sprytnie. Powierzchnia toczna kolejowych kół, która styka się z szyną, nie ma stałej średnicy. Średnica ta jest najmniejsza po zewnętrznej stronie kół i zwiększa się od strony środkowej, aż do obrzeża zapobiegającego wypadnięciu pociągu z torów. Działa to następująco: gdy pociąg pokonuje zakręt, koła po zewnętrznej stronie zakrętu mają tendencję do zbliżania się swymi obrzeżami do szyny. Po szynie toczą się więc swoją większą średnicą. Koła po drugiej stronie toczą się natomiast po szynie swą mniejszą średnicą. Powoduje to zminimalizowanie różnicy prędkości obrotowych kół, przeciwdziałając powstawaniu poślizgu i naprężeń. Oprócz tego, aby pojazdy kolejowe o większej ilości osi mogły skręcać, poszczególne ich osie umieszcza się w wózkach (najczęściej po dwie lub trzy), które mogą obracać się względem pojazdu. W przypadku trzech lub więcej osi w wózku, środkowa oś posiada często możliwość przesuwania się, aby pokonać łuk. Większy problem występował np. w parowozach posiadających dużą ilość osi napędowych, które nie mogły być umiesz-

czone w wózkach. Stosowano tam możliwość przesuwania się niektórych osi lub podcinania obrzeży kół, tak aby lokomotywa mogła przejeżdżać przez łuki.



Rysunek 2.10: Koło lokomotywy z widocznie zmieniającą się średnicą



Rysunek 2.11: Lokomotywa parowa posiadająca w sumie 6 osi, zdolna do pokonywania nawet ciasnych łuków



Rysunek 2.12: Wózki skrętne wyposażone w po dwie osie każdy