

Propozycja układu automatycznego sterowania stateczności wagonu wielopoziomowego w torze pochylonym

Przedmiotem artykułu jest studium sterowania stateczności wagonu specjalnego w torze pochylonym. Celem artykułu jest wskazanie możliwości automatyzacji poprzecznego przesuwu ładunku dla zapewnienia zarówno stateczności strukturalnej jak też odpowiednio bezpiecznych wartości nacisków kół odciążonych.

1. Wstęp

Transport ogromnych ładunków takich jak rakiety, reaktory jądrowe, silniki okrętowe, turbozespoły energetyczne lub transformatory stanowi duże wyzwanie dla firm oferujących takie usługi. Przemieszczanie ładunków skupionych możliwe jest za pomocą specjalnych pojazdów do tego celu przeznaczonych. Jednym z przewoźników, który oferuje przewóz takich wielkogabarytowych ładunków skupionych o wielkiej masie jest kolej. Do zrealizowania takiego zadania używany jest specjalistyczny tabor, są to wagony wieloosiowe, które wśród specjalistów są dość powszechnie znane jako **wagony dziobowe** (niem. Schnabelwagen). Na świecie istnieje około 80 takich wagonów o różnej strukturze mechanicznej i różnej ładowności, w Polsce na chwilę obecną są do tego celu wykorzystywane dwa wagony Norca 32 (ładowność do 400 ton netto), Norca 24 (ładowność do 250 ton netto).

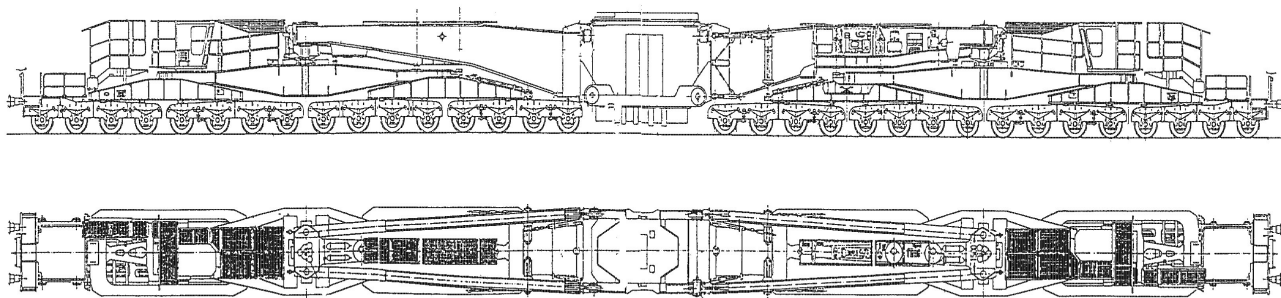
Dla bezpiecznego przemieszczania ładunku w torze wymaga się uwzględnienia ekstremalnych wartości nacisków kół na szynę, ekstremalnych promieni łuków torowych i bocznych pochyleń toru oraz nośności mostów i wymiarów tuneli oraz zazwyczaj

bardzo ograniczonej prędkości przewozowej. Ze względu na długość wagonu, która wynosi w stanie ładownym pomiędzy zderzakami około 70 metrów, przewóz ładunków o ogromnej masie jest prowadzony na ogół po marszrucie wybranej indywidualnie.

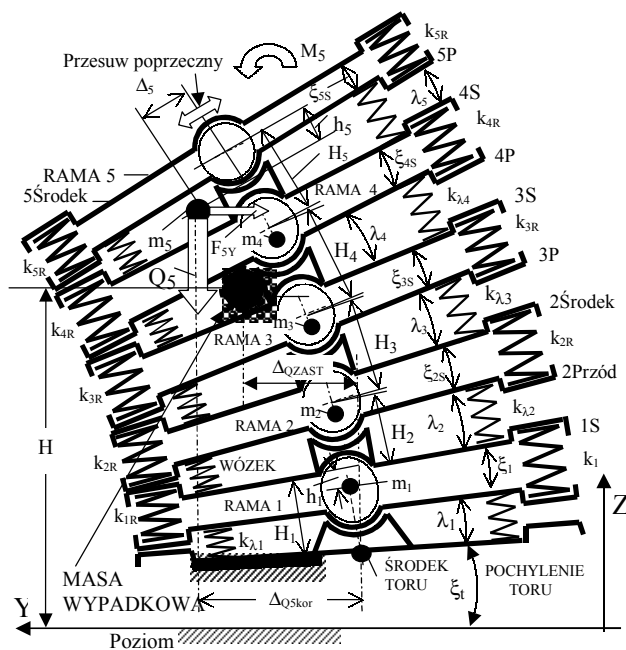
Prędkość ruchu wagonu dziobowego w torze prostym jest ograniczona do ok. 80 km/h w stanie próżnym, a 50 km/h w stanie ładownym, w łukach i rozjazdach jest jeszcze mniejsza - nawet do ok. 5 km/h.

Ważne jest, aby tak złożona, wielopoziomowa struktura, która wyróżnia się sprężystością, zapewniała stateczność równowagi. Schemat wielopoziomowego wagonu w widoku z góry i z boku pokazano na rysunku 1, natomiast na rysunku 2 przedstawiono schemat poprzeczny struktury sprężystej.

W torze pochylonym praktyczne zapewnienie stateczności struktury, pokazanej na rysunku 2, wymaga stosowania korekcyjnych przemieszczeń poprzecznych najwyższego, ładunkowego poziomu ramowego w postaci przesuwu γ_5 . W wagonach specjalnych przemieszczenia te są sterowane ręcznie, nie oznacza to jednak, że nie można ich zautomatyzować.



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny specjalnego wielopoziomowego wagonu 32 – osiowego z 8 wózkami czteroosiowymi, w stanie ładownym



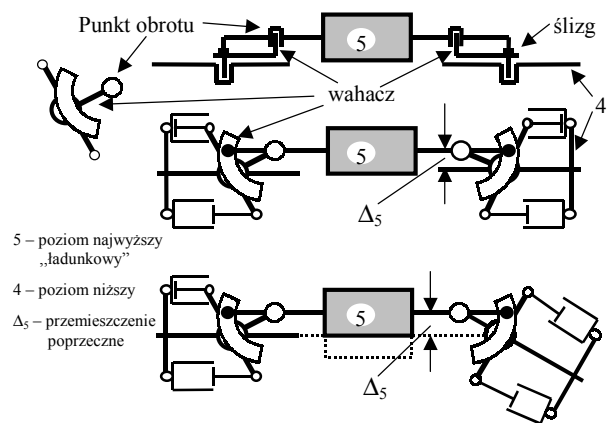
Rys. 2. Schemat wielopoziomowej struktury sprężystej wagonu

2. Sterowanie przesuwem poprzecznym Δ_5 wsporników najwyższego, ładunkowego poziomu ramowego.

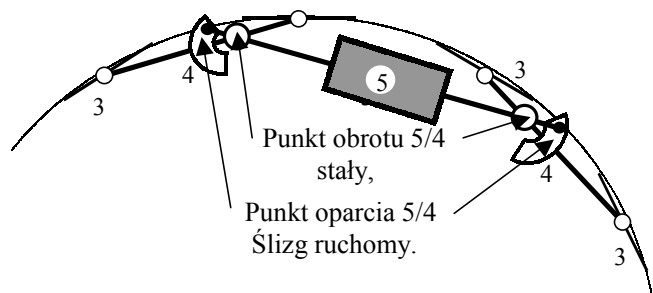
Realizowanie sterowania poprzecznego położenia jest możliwe przez zastosowanie tzw. „czopa zredukowanego”. Oprócz sterowania przesuwem poprzecznym, czop zredukowany umożliwia przenoszenie nacisku masy poziomu najwyższego (ładunkowego), na centralną część ramy poziomu niższego przy niecentralnym położeniu osi obrotu międzypoziomowego. Liczba poziomów ramowych (w zawsze podłużnie symetrycznej) strukturze wagonów wielopoziomowym zależy od całkowitej liczby osi w wózkach.

W wagonach specjalnych możemy spotkać dwa rodzaje czopów zredukowanych:

- sterowane umożliwiające sterowanie położenia osi obrotu na ramie 4 rys. 3 i 4,
- stałe umożliwiające sterowanie położenia osi samoczynnie, podczas wpisywania się wagonu w łuk rys. 5.



Rys. 4. Zasada sterowanego czopa zredukowanego, pracującego zarówno w torze prostym, jak i w łuku

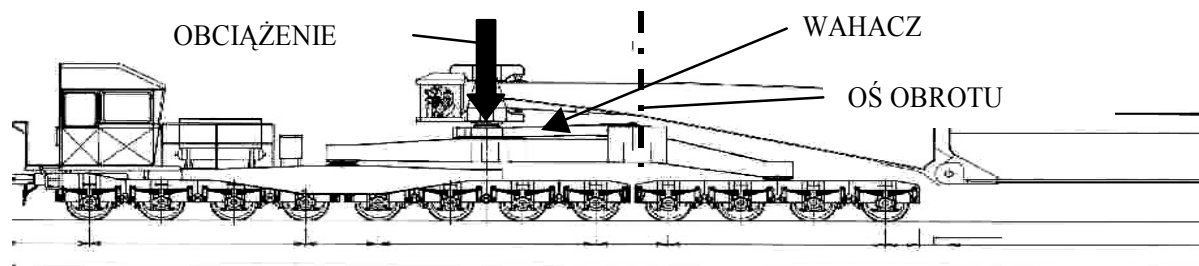


Rys. 5. Rozdzielone funkcje punktów obrotu i oparcia ramowego poziomu ładunkowego 5 na poziomie 4 - stały czop zredukowany

3. Sterowanie „on-line” przesuwem poprzecznym Δ_5

Poprzeczny przesuw najwyższego poziomu ładunkowego jest najczęściej realizowany przez elementy hydrauliczne. Sterowanie poziomem jest realizowane ręcznie i kontrolowane przez inżyniera ruchu. Przesuw poprzeczny o zadaną wielkość można zautomatyzować przez zastosowanie układu sterującego, który dynamicznie kontrolowałby przesuw poziomu najwyższego w zależności od przechyłu i prędkości wagonu.

W nowoczesnym wagonie układ sterowania przesuwem ładunku, w zakresie poza stanem alarmowym, powinien być autonomiczny. W stanie alarmowym



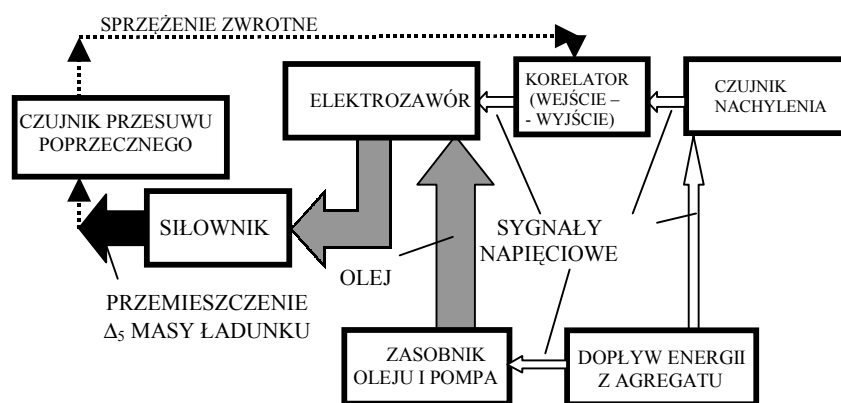
Rys. 3. Schematyczna ilustracja budowy sterowanego „czopa zredukowanego” na przykładzie wagonu 24-osiowego.

sterowanie (i odpowiedzialność za decyzje) przejmuje człowiek.

Automatyczne sterowanie przesuwu można zrealizować stosując układ składający się z następujących podzespołów:

- *Podzespołu hydraulicznego*, dokonującego przesuwu poprzecznego.
- *Modułu kontrolnego*, sterującego podzespołem hydraulicznym.

Na rysunku 6 pokazano schemat sterowania przemieszczeniem Δ_5



Rys. 6. Schemat układu sterowania przemieszczenia Δ_5

Układ hydrauliczny jest to zwykle przekładnia hydrostatyczna składająca się z:

- *pompy hydraulicznej* (o stałej lub zmiennej wydajności).
- *zaworów* zabezpieczających układ hydrauliczny (zawór przelewowy, zawór zwrotny nieobciążony) oraz rozdzielających (rozdzielacz proporcjonalny jednostopniowy) ciecz do siłownika powodując przesuwanie tłoczyska wraz z poziomem piętym w lewo lub w prawo.
- *siłownika hydraulicznego*.

Sterowanie przesuwu suwaka jednostopniowego elektrohydraulicznego rozdzielacza proporcjonalnego realizowane jest przez elektromagnesy, które wychylają ten suwak rozdzielacza w zależności od wielkości sygnału.

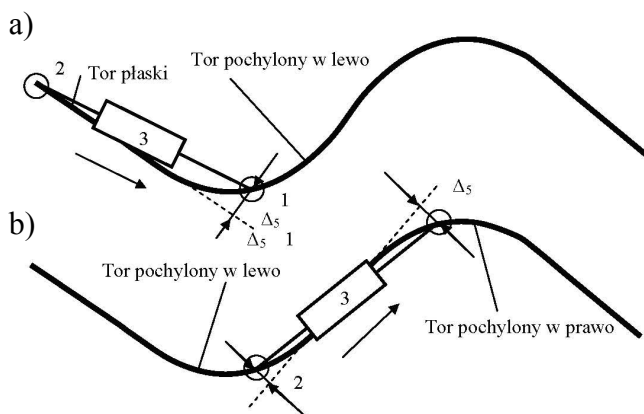
W wagonie wielopoziomowym występuje znaczna liczba parametrów. Nie wszystkie one mogą podlegać sterowaniu. Jednak stateczność położenia wagonu w torze pochylonym może i - powinna - podlegać sterowaniu. Stateczność, ze znacznym zapasem bezpieczeństwa pomiędzy stanami uznanymi jako alarmowe, musi być zachowana niezbywalnie. Jest racjonalnym postulatem, aby układ sterujący reagował na boczne pochylenie toru, boczne pochylenie najwyższego poziomu ramowego oraz prędkość ruchu

pojazdu w łuku. Jeżeli jednak zamiast trzech bezwzględnych sygnałów: bocznych pochyłości toru, bezwzględnych bocznych pochyłości najwyższego poziomu ramowego i sygnałów prędkości ruchu, posłużymy się sygnałem niedostatku (lub nadmiaru) przechyłki kinetycznej najwyższego poziomu ramowego, to trzy wartości sygnałów bezwzględnych zostaną bezpiecznie zastąpione przez ten jeden sygnał względny.

W przypadku pokonywania przez wagon specjalny łuku typu „S”, wagon taki musi być wyposażony w dwa urządzenia sterujące przesuwem najwyższego poziomu ramowego. Konieczność ta wynika z charakteru wpisywania się wagonu w łuk „S”.

Należy tak sterować przesuwem ramowego poziomu ładunkowego (zarówno na przodzie jak i na tyle wagonu), aby nie doszło do kontaktu z budowlami i urządzeniami przytorowymi, pamiętając jednocześnie o bezpiecznym rozkładzie nacisków na tor. Specyfika łuku „S” wymaga odpowiedniego przesuwu ładunku w zależności od pozycji zajmowanej przez wagon.

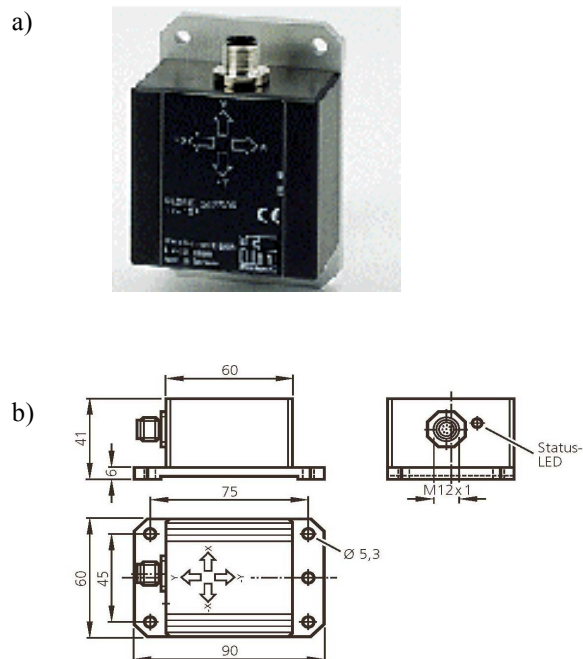
Przy wjeździe w łuk, (np. według rysunku 11a), dla zapewnienia równomiernego rozłożenia nacisków kół na tor, ramowy poziom ładunkowy przodu wagonu (zgodnie z rysunkiem 2) należy przemieszczać w kierunku szyny zewnętrznej. Wraz z dalszym poruszaniem się wagonu, a co za tym idzie zmianą pozycji w łuku, odpowiednio następuje niezależne równoczesne przesuwanie końców ramowego poziomu ładunkowego na przodzie i na tyle wagonu. Na rysunku 11b została pokazana pozycja wagonu, przy której obydwie końce najwyższego poziomu ramowego są przesunięte względem siebie w kierunkach przeciwnych. W tym położeniu występuje również zwichrowanie wagonu a tym samym pojawia się niebezpieczeństwo nierównomierności nacisków przekątnych (biorąc pod uwagę pełną strukturę wagonu w planie toru). Z tego względu wagon musi mieć dostatecznie duże możliwości kątowych pochyłości międzypoziomowych, zgodnie z rysunkiem 2. Te kątowe pochylenia realizuje się dzięki zastosowaniu ślizgów bocznych z więzami sprężystymi i odpowiednio dużymi luzami kątowymi (do ograniczników). Odpowiedni dobór sztywności elementów sprężystej struktury wielopoziomowego wagonu został omówiony w pracach [4] i [5].



Rys. 7. Widok ogólny pozycji zajmowanych przez wagon w łuku typu „S”. 1-przód wagonu, 2 – tył wagonu, 3 – ładunek, Δ_5 – poprzeczne przemieszczenie ładunku.

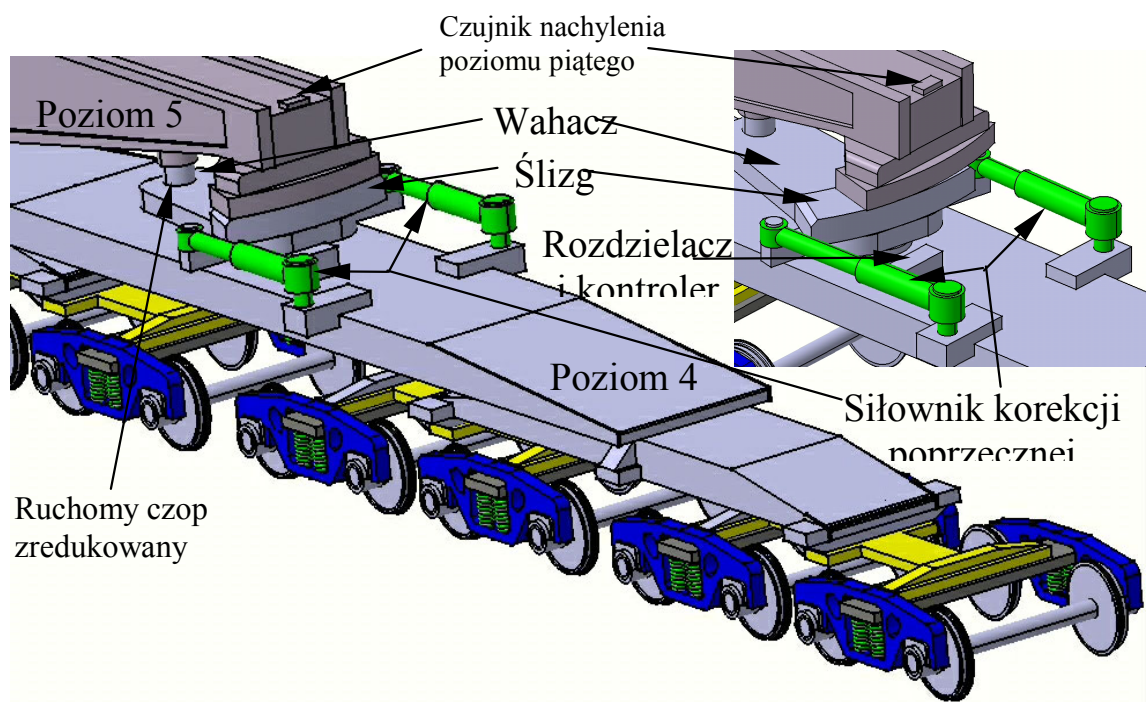
Dla prawidłowego działania układu kontrolnego należy zastosować czujnik nachylenia i przemieszczenia poziomu najwyższego.

Zadanie należące do czujnika nachylenia to zbieranie informacji o wartości kąta i kierunku niedostatku (lub nadmiaru) kinetycznej przechyłki wagonu (w torze). Informacje te są przekazywane do jednostki sterującej, jaką może być komputer PC. Jednostka ta, przy wykorzystaniu wzorów zamieszczonych w pracy [1], określa bezpieczną wartość przesunięcia poprzecznego Δ_5 oraz kierunek przesuwu (lewo, prawo).



Rys. 8. Czujnik nachylenia typ CR2102, a) widok ogólny, b) wielkości gabarytowe [2]

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowy czujnik nachylenia, jaki można zastosować w układzie kontrolnym. Czujnik mocujemy na najwyższym poziomie ramowym jak na rysunku 9.

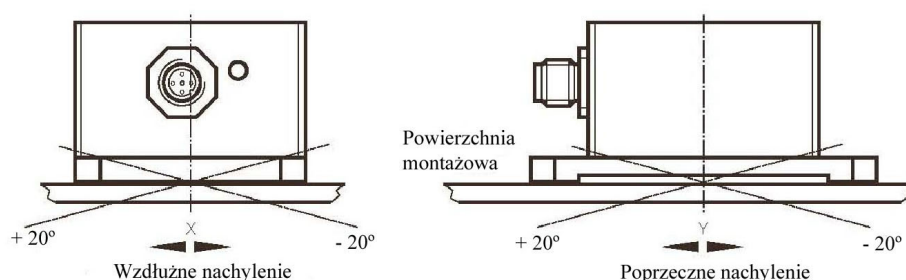


Rys. 9. Widok ogólny sterowanego czopa zredukowanego, pracującego zarówno w torze prostym, jak i w łuku

Dane techniczne czujnika nachylenia typu CR2102 [2]

Tabela 1

| | |
|----------------------------|---|
| Housing | aluminium, black anodised |
| Mounting plate | aluminium, natural-coloured |
| Mounting | by means of M5 screws |
| Protection | IP 67 |
| Connection | M12 plug for operating voltage, CAN bus and analogue outputs 8 pins (type Lumberg) |
| Operating voltage | 10...30 V DC SELV |
| Power consumption | ≤ 1.9 W |
| Operating temperature | -30...+80°C |
| Storage temperature | - 40...+85°C (not to be subjected to shock below -25°C) |
| Measuring range (per axis) | ±45° |
| Resolution | parameterisable 0.1/0.5/1.0° (when data is evaluated via CAN bus) |
| Accuracy | 0,5° |
| Temperature drift | 0.2%/ K |
| Cross tilt | 3 % |
| Analogue outputs Load | 2 current interfaces 4...20 mA for X and Y axes 250 Ω (10 V supply), 500 Ω (24 V supply) |
| Interface | CAN interface 2.0 B, ISO 11898 |
| Baud rate | 20 Kbits/s...1 Mbits/s (125 Kbits/s default) |
| Communication profile | CANopen, CiA DS 301 version 4.01, profile WDP 410 |
| Node ID (default) | hex 20 (= 32) |
| Operating indication | two-colour LED (red/green) |



Rys. 10. Możliwości pomiarowe względem poprzecznej i wzdłużnej osi

Czujnik charakteryzuje się dużym zakresem pomiaru kąta względem osi wzdłużnej i poprzecznej $\pm 45^\circ$, oraz temperaturą pracy od -30° do 80° . Posiada również funkcję, która umożliwia ustawienie przedziału, w jakim będzie dokonywany pomiar. W naszym przypadku może to być przedział od -20° do $+20^\circ$ [1], temperatura pracy również odpowiada wymaganiom stawianym przez kolej. Dane techniczne czujnika przedstawia tabela 1.

Dzięki zastosowaniu czujnika nachylenia uzyskujemy trzy sygnały sterujące:

- 1) sygnał **KIERUNKU** pochylenia najwyższego poziomu ramowego (w lewo, w prawo),
- 2) sygnał kątowej **WARTOŚCI** pochylenia,
- 3) sygnał osiągnięcia pochylenia **ALARMOWEGO**, po osiągnięciu granicznych położenia zdeterminowanych warunkami bezpieczeństwa.

Dla zapewnienia prawidłowego działania układu sterującego przesuwem poprzecznym, oprócz czujnika pochylenia, należy zastosować czujnik przemieszczenia. Jego zadaniem polegałoby na mierzeniu wielkości przesuwu poprzecznego Δ_5 , według rysunku 6. Czujnik pochylenia przekazuje sygnał do jednostki sterującej o wartości kąta i kierunku pochylenia. Ta, po obróbce sygnału, powoduje otwarcie elektrozaworu, następuje pompowanie oleju do siłownika przesuwu poprzecznego. Układ musi 'wiedzieć', kiedy ma nastąpić przerwa w podawaniu oleju do siłownika; informacji tej dostarcza czujnik przemieszczenia przesuwu poprzecznego. Czujnik ten połączony jest z jednostką sterującą poprzez sprzężenie zwrotne. Dzięki temu informacja o wartości przemieszczenia poprzecznego Δ_5 poziomu ładunkowego, w postaci sygnału, jest przekazywana do jednostki sterującej. Poprzez porównanie sygnału z czujnika przemieszczenia

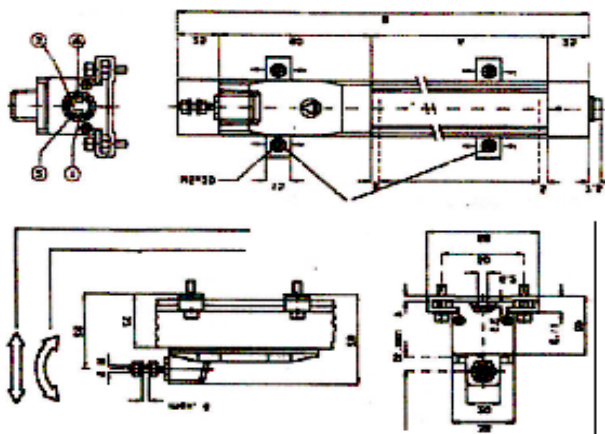
i obrobionego sygnału z czujnika pochylenia, jednostka sterująca zamyka lub otwiera elektrozawór, który realizuje przepływ oleju do siłownika. Czujnik przemieszczenia możemy zamocować na cylindrze siłownika jak na rysunku 12, przemieszczenie cylindra względem punktu odniesienia będzie wychwytywane przez czujnik.

Rys. 11 przedstawia przykładowy czujnik przemieszczenia, jaki można zastosować w układzie kontrolnym. Konstrukcja czujnika umożliwia utrzymanie wysokiej rozdzielczości i dokładności również dla dużych przesunięć. Przenoszenie sygnału przesunięcia poprzez przeguby kulowe, cięgła drutowe lub linowe, itp. jest niewygodne przy bezpośrednich pomiarach przesunięcia. 'Przełączniki drogowe' są potencjometrycznymi czujnikami przemieszczeń, przeznaczonymi do bezpośrednich pomiarów, badania i nadzoru małych przesunięć mechanicznych. Warunkiem bardzo długiego czasu życia czujnika jest zachowanie równoległości suwadła i obiektu mierzonego.

a)



b)

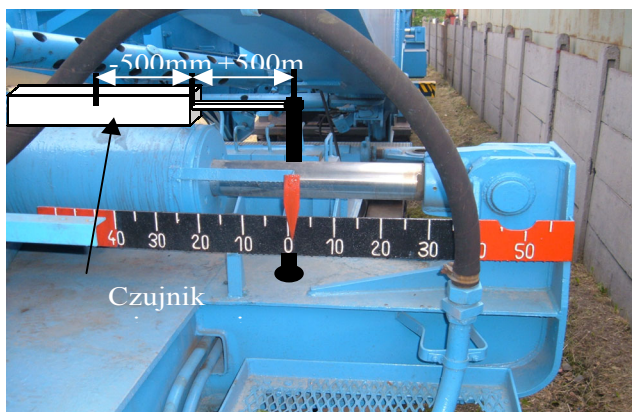


Rys. 11. Potencjometryczny czujnik przemieszczenia,
a) widok ogólny, b) wielkości gabarytowe [3]

Dane techniczne czujnika przemieszczenia typu 8717 [3] Tabela 2

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Zakres [mm] | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 750 | 1000 | 1250 | 1500 | 1750 | 2000 |
| Max. elektr. dług. pomiarowa [mm] | 103 | 153 | 204 | 305 | 406 | 509 | 611 | 763 | 1017 | 1271 | 1521 | 1771 | 2021 |
| Max A [mm] | 113 | 163 | 214 | 315 | 416 | 519 | 621 | 773 | 1027 | 1261 | 1531 | 1781 | 2031 |
| Błąd liniowości [%zakresu] | ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | ±0.1 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 | ±0.05 |
| Rezystancja wewnętrzna | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Długość obudowy B [mm] | 253 | 303 | 354 | 455 | 556 | 659 | 781 | 913 | 1167 | 1421 | 1671 | 1921 | 2171 |
| Masa [kg] | 0.5 | 0.58 | 0.65 | 0.80 | 0.95 | 1.1 | 1.25 | 1.5 | 1.85 | 2.25 | 2.6 | 3.0 | 3.8 |

Przesuw poprzeczny wynosi +/- 500mm w sumie 1000mm, dlatego też możemy zastosować czujnik o zakresie pomiarowym 1000mm tabela 2.



Rys. 12. Widok możliwości zamocowania czujnika przemieszczenia na rzeczywistym obiekcie

Literatura

- [1] Madej J. Podsiadło R. – „Wagony specjalne do przewozu ładunków wielkogabarytowych o dużej masie. Zasady budowy i sterowania”. Warszawa 2006, Druk: Wydawnictwo ITE Radom.
- [2] <http://www.ifmefector.com/ifmpl/web/dsfs!CR2102.html>
- [3] Katalog czujników firmy Buster. <http://www.burster.com/>
- [4] Madej J, Podsiadło R. „Racjonalna struktura usprężynowania wielopoziomowego wagonu specjalnego z wózkami klasycznymi do przewozu ogromnych mas”. Pojazdy Szynowe nr. 3/2005.
- [5] Madej J, Podsiadło R.: „Racjonalna struktura usprężynowania wielopoziomowego wagonu specjalnego, z wózkami o wahliwych podłużnicach (typu „Diamond”), do przewozu ogromnych mas w warunkach znacznych zwichrowań toru”. Pojazdy Szynowe nr. 1/2006.
- [6] Rafał Podsiadło: Analiza wielopoziomowych struktur sprężystych podwozi wagonów specjalnych do przewozu ładunków o dużej masie. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska 2006

WNIOSKI KOŃCOWE.

1. Zastosowanie automatyki wspomaga sterowanie geometrii złożonej struktury wieloosiowego wagonu specjalnego, w zależności od topografii szlaku kolejowego, z punktu widzenia ogólnie pojmowanego bezpieczeństwa ruchu w torze.
2. Ruch wagonu specjalnego ze względu na jego długość, w łukach i krzywoliniowych odcinkach toru, jest uwarunkowany prędkością ruchu, oraz programowanym przemieszczeniem poprzecznym Δ_5 najwyższego poziomu ładunkowego, ze względu na skrajnię budowli.
3. Możemy wpływać na grawitacyjną stateczność wagonu podczas jego powolnego ruchu stosując poprzeczne przemieszczanie środka masy ładunku. Ważne jest, aby sprawdzać, czy wyznaczona wartość przemieszczenia Δ_5 nie jest na tyle duża, aby zagrażać naruszeniem strukturalnej stateczności wagonu [6, rozdział 11,13,14,17].