

Szklarski L. kierownik grantu
Grzbiela Cz., Machowski A.,
Machowski J., Skalny A., Zając M.
Katedra ANiUP AGH, Kraków

Wspomagana komputerowo analiza i synteza sterowania
systemu [koparka-robot]-[trakcja elektryczna]
w procesie urabiania i odstawy kopalin użytecznych
(projekt badawczy nr S5.5 8 8524 91 02)

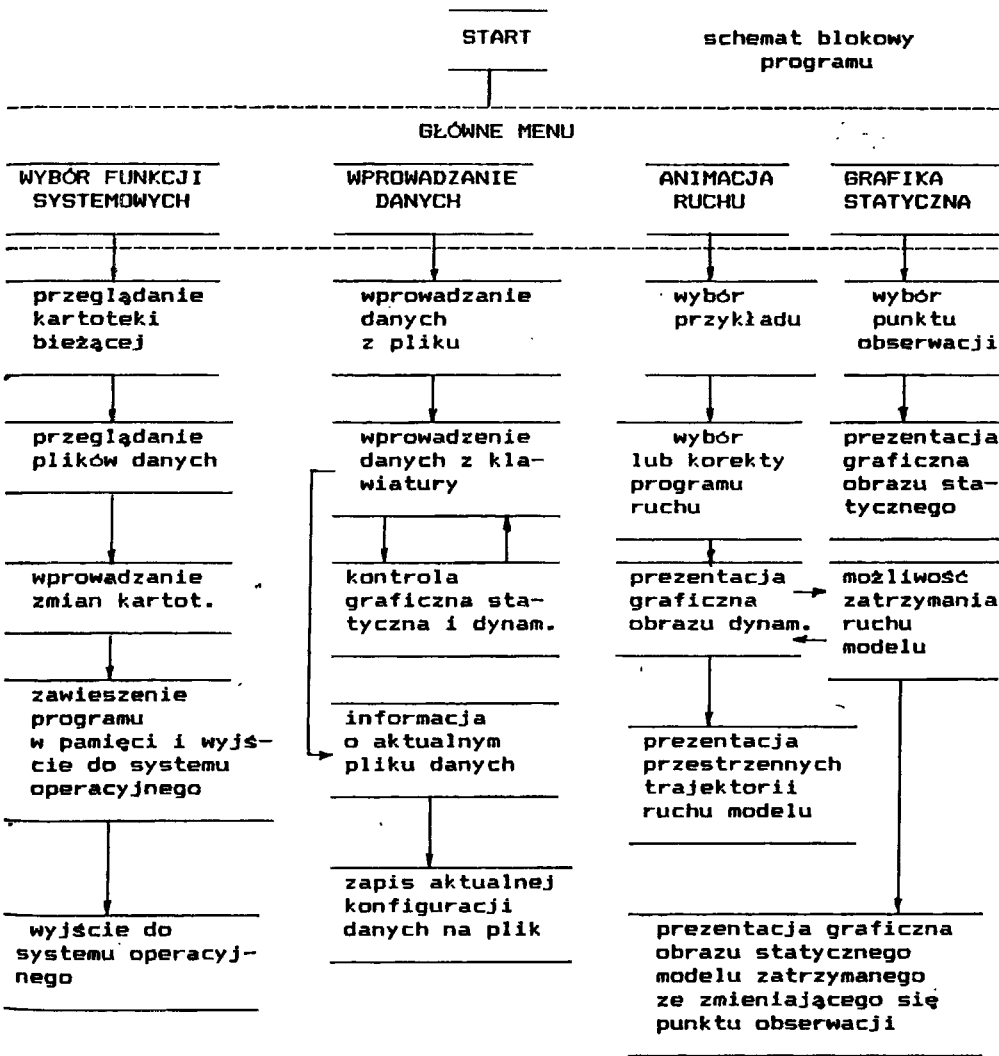
Wprowadzenie

Obiektem badań jest model systemu [koparka-robot]-[trakcja elektryczna] realizującego proces urabiania i odstawy kopalin. Według założeń autorów podstawowe mechanizmy koparki łyżkowej mogącej pracować jako robot będą wyposażone w napędy elektryczne z silnikami prądu stałego i przemiennego zasilanymi z przekształtników tyrystorowych, zaś napęd lokomotywy pociągu odstawczego stanowią silniki prądu stałego szeregowo zasilane z przekształtnika tyrystorowego.

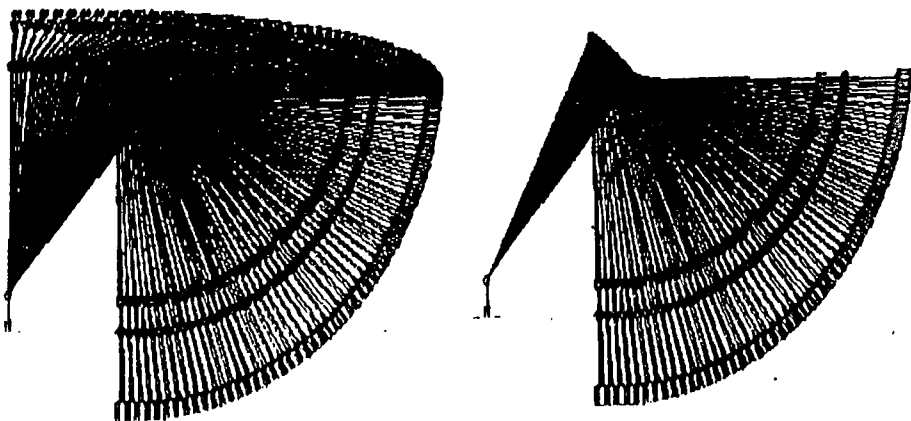
Celem badań jest opracowanie metod wspomaganego komputerowo projektowania bloków napędowych i układów ich sterowania oraz struktury sterowania nadrzędnego współpracujących maszyn. Niniejsze opracowanie jest krótkim omówieniem niektórych zadań badawczych już ukończonych i zadań pozostających w realizacji.

1. Wyjściowy model koparki-roboty, zagadnienia kinematyki.

W odróżnieniu od klasycznych koparek łyżkowych rozważa się tutaj model koparki-roboty, która jest wyposażona w głowicę obrotową łyżki umieszczoną w ramieniu łyżki oraz mechanizm nachylania łyżki. Przyjęta konstrukcja posiada sześć stopni swobody. Opracowano pakiet programów obliczania prostego i odwrotnego zagadnienia kinematyki oraz statycznej i dynamicznej wizualizacji pracy koparki-roboty. Pakiet ten jest niezbędny do analizy modelu, a więc podstawą efektywnej syntezy układów sterowania. Przewidziano w nim możliwość zmian parametrów modelu i ograniczeń. Wykorzystując własności macierzy rzadkich, autorzy uzyskali krótki czas szeregowego algorytmu obliczeń przy przekształceniach przestrzennych. Stale rozbudowywany schemat blokowy pakietu podano niżej.



Zależności określające przekształcenia współrzędnych w przestrzeni trójwymiarowej opisano przy użyciu algebry wektorowej, natomiast do tworzenia obrazów dwuwymiarowych na ekranie komputera wykorzystano rzuty ortogonalne. Poniżej dla ilustracji zamieszczono kilka arbitralnie wybranych obrazów trajektorii kinematycznego modelu koparki.



Rys.1. Przykładowa ilustracja ruchu koparki.

Znaczne skrócenie czasu obliczeń uzyskano przez zastosowanie komputerów do równoległego przetwarzania w algorytmie obliczeniowym. Najistotniejszą rolę odgrywają dwie procedury numeryczne: mnożenie macierzy i mnożenie wielomianów.

Algorytm równoległy - mnożenie macierzy.

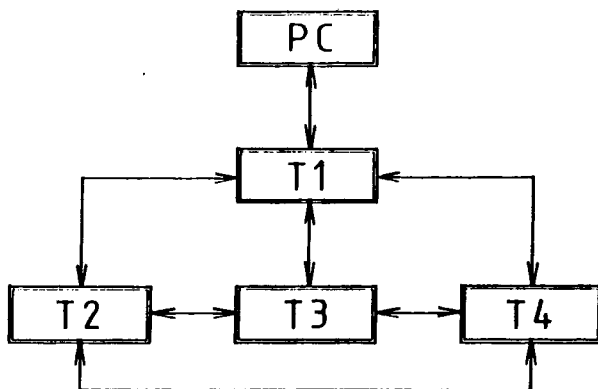
Niech będą macierze : $A(n \times n)$, $B(n \times k)$, $C(m \times k)$
 oraz wskaźniki : $1 \leq i \leq m$; $1 \leq j \leq n$; $1 \leq s \leq k$
 zapis algorytmiczny jest następujący

```

void    MNMAC(A,B,C)
{
  par ( i=1 ; i< m+1 ; i++)
    par ( j=1 ; j< k+1 ; j++)
    {
      cij = 0 ;
      par ( s=1 ; s< n+1 ; s++)
        cij = ais bsj ;
    }
}

```

Analizując wydajność powyższego algorytmu można wnioskować, że jego koszt w sensie $c(n)=p(n)*t(n)$ jest taki sam jak klasycznego algorytmu szeregowego. Przy sterowaniu bezpośrednim robota, ważniejszy jest jednak czas $t(n)$, który przy liczbie procesorów $p(n)=mnk$ można oszacować jako $O(1)$. Autorzy dysponowali czterema procesorami stąd też, dla przejrzystości strukturalnej, każdą z trzech dyrektyw par realizowano na jednym procesorze. Procesor czwarty służył jako połączenie układu z procesorem macierzystym PC, tak więc wykorzystano następującą strukturę sieci transputerowej (rys.2)



Rys.2. Sieć transputerowa

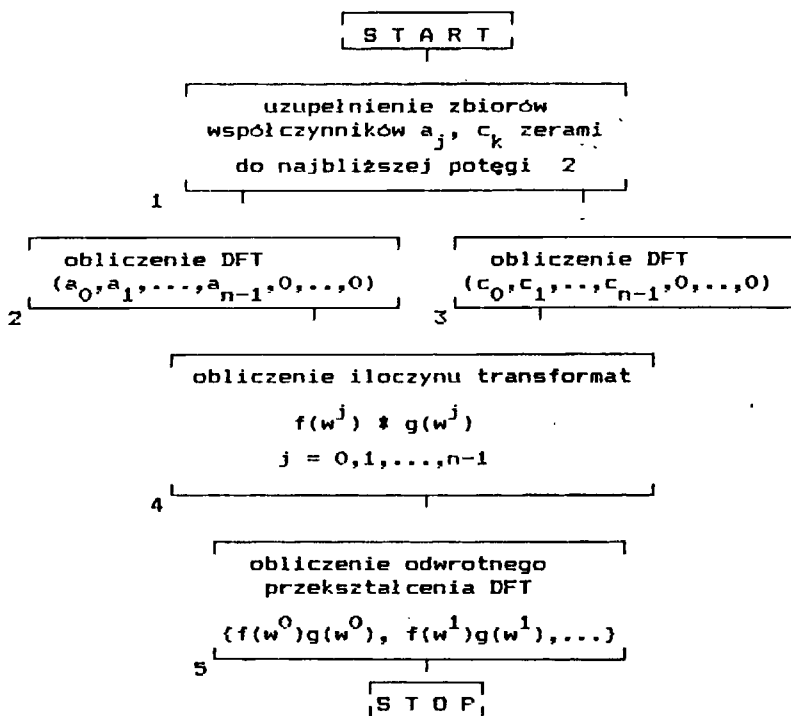
Dla macierzy $(4*4)$ uzyskano około 25-krotne przyspieszenie obliczeń, co umożliwia wykorzystanie modelu matematycznego koparki-robota w czasie rzeczywistym.

Mnożenie wielomianów.

Podano efektywny algorytm mnożenia wielomianów

$$f(x) = \sum_{j=0}^{n-1} a_j x^j \quad \text{i} \quad g(x) = \sum_{k=0}^{n-1} c_k x^k$$

Wykorzystując dyskretną transformatę Fouriera (DFT), następna strona.



Dla klasycznego równoległego procesu obliczeniowego można oszacować nakłady obliczeniowe jako $O(n^2)$. Przez zastosowanie DFT można te nakłady ograniczyć do $O(n \log_2 n)$. Krok 1 zużywa $O(N)$ czasu maszynowego, natomiast każdy z kroków 2, 3, 5 wymaga $O(N \log_2 N)$ czasu procesora. Krok 4 wymaga wykonania N mnożeń. Ponieważ $N < 4n$ można oszacować całkowity czas maszynowy procedury jako $O(n \log_2 n)$. Dla $n=4$ przyspieszenie jest około dwukrotne.

2. Zagadnienia napędowe.

Koparki łyżkowe należą do grupy maszyn ciężkich, które w swej klasycznej konstrukcji znajdują, obok innych maszyn, zastosowanie w rozmaitych gałęziach przemysłu wydobywczego surowców energetycznych i mineralnych oraz w budownictwie. Warunki pracy napędów tego typu maszyn należą do szczególnie trudnych, głównie ze względu na różnorodność trajektorii ruchu, zmienne obciążenia i zakłócenia. Roboty ciężkie sukces-

sywnie będą wypierać te maszyny, gdy spełniać będą warunek—muszą być wyposażone w nowoczesne napędy z układami automatycznej regulacji i sterowania, które zapewnią najlepszą pracę robota. W trudnych warunkach eksploatacyjnych pewną i efektywną pracę robota mogą zapewnić napędy tyrystorowe prądu stałego i przemiennego. W badaniach niniejszych autorzy wykorzystują przeważnie dwa użyteczne modele matematyczne opisujące dynamikę napędu.

$$1. \quad \dot{x}(t) = A_c(t) x(t) + B_c(t) u(t) + E_c m_{ob}(t)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = & A_{cL}(t) x(t) + A_{cN}(t) [x_i(t) \ x_j(t)] + \\ & + B_{cN}(t) [x_i(t) \ u_p(t)] + B_{cL}(t) u(t) + E_c(t) m_{ob}(t), \end{aligned}$$

gdzie $i, j = 1, 2, \dots, n$; $p = 1, 2, \dots, r$

n - rząd układu, r - wymiar wektora sterowania.

W drugim modelu najczęściej mamy do czynienia z przypadkiem, gdy $i=j$. W rozszerzonym modelu uwzględnia się zakłócenia na wejściu i wyjściu oraz w torach pomiarowych. Do analizy komputerowej oraz syntezy cyfrowych układów sterowania autorzy korzystali z modeli dyskretnych otrzymanych drogą przekształcenia modeli ciągłych przez zastosowanie dyskretnego różniczkowego przekształcenia taylorowskiego, szeregów Czebyszewa i dyskretnych impulsowych funkcji ortogonalnych.

Synteza regulatorów cyfrowych - realizacje komputerowe.

Dla napędów koparki-roboty zaprojektowano i przebadano na drodze symulacji różne struktury regulatorów cyfrowych, począwszy od konwencjonalnego regulatora cyfrowego PID. Ogólnie, poprawną pracę napędu, któregośkolwiek mechanizmu koparki, może zapewnić tylko taki regulator, który spełnia zadanie stabilizujące i z wystarczającą dokładnością odwzorowuje zadane wielkości sygnałów sterujących. Dla napędu prądu stałego z silnikiem zasilanym z przekształtnika tyrystorowego, przebadano układy zamknięte z regulatorami prędkości i drogi oraz liniowymi regulatorami od zmiennych stanu. Napęd jest tutaj opisany równaniem stanu - model dyskretny:

$$x(k+1) = A x(k) + b u(k) + E m_{ob}(k)$$

$$y(k) = C x(k)$$

Dla układu napędowego z regulacją prędkości obrotowej silnika wektor wzmocnienia $K = [K_1 K_2 K_3 K_4]^T$ oblicza się z równania:

$$K = \begin{bmatrix} \{ \text{adj} [z_1 I - A_0] B_0 \}^T \\ \{ \text{adj} [z_2 I - A_0] B_0 \}^T \\ \{ \text{adj} [z_3 I - A_0] B_0 \}^T \\ \{ \text{adj} [z_4 I - A_0] B_0 \}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \det [z_1 I - A_0] \\ \det [z_2 I - A_0] \\ \det [z_3 I - A_0] \\ \det [z_4 I - A_0] \end{bmatrix}$$

gdzie z_i - wartości własne układu zamkniętego, natomiast

$$A_0 = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ -C & I & 0 \\ 0 & I & I \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Schemat układu pokazano na rysunku 3, natomiast schemat podany na rysunku 4 jest cyfrowym układem sterowania z zadaniem położenia.

Schemat na rysunku 5 przedstawia złożony układ z estymacją zmiennych stanu i momentu obciążenia, gdy na wyjściu oddziałuje zakłócenie.

Jak wskazują badania, napęd w takim układzie jest odporny na zmiany momentu obciążenia, a drgania pojawiające się w całym układzie elektro-mechanicznym są dostatecznie ograniczane. Obecnie autorzy prowadzą badania nad sterowaniem napędu z silnikiem asynchronicznym klatkowym zasilanym z falownika prądowego oraz algorytmem sterowania optymalnego napędu prądu stałego z zadanymi warunkami brzegowymi.

3. Sterowanie elektrycznego pociągu odstawczego.

Sposób sterowania pociągu w rejonie ładowania urobku podyktowany jest warunkami geologicznymi i organizacją transportu. Tutaj przyjęto, że ładowanie zaczyna się od pierwszego wagonu znajdującego się bezpośrednio za lokomotywą, a pociąg przemieszcza się w czasie załadunku. Zakłada się stałe śledzenie położenia koparki względem lokomotywy oraz spełnienie warunku najmniejszej odległości koparki od punktu załadunku.

Na rysunku 6, w dwóch punktach A i B leżących w osi torowiska i usytuowanych na krańcach rejonu eksploatacji dokonuje się pomiaru aktualnej odległości od nich lokomotywy (l_{LA}, l_{LB}) i koparki (b_{KA}, b_{KB}). Niezbędny jest również pomiar odległości H (koparka-pociąg) wzdłuż normalnej do torowiska. Wyznacza się współrzędne x_L, x_K , co przy znanej długości lokomotywy i wagonów, pozwala na odpowiednie przetoczenie pociągu tak, aby koparka i właściwy wagon znalazły się na normalnej do osi torowiska. Przyjęto, że każdy z kolejnych k wagonów (rys.6b) będzie ładowany w dwóch fazach: w pierwszej, gdy spełniona jest równość

$$x_L = x_K + l_{1/2} + (2k - 1) l_{w1} + (k - 1) l_{w2}$$

oraz w drugiej, gdy

$$x_L = x_K + l_{1/2} + (2k - 1) l_{w1} + k l_{w2}$$

Przyjęte rozwiązanie, w którym wysięgnik koparki wykonuje dla rozładunku łyżki ruch po normalnej do osi torów (rys. 7) pozwala na uzyskanie największej odległości koparka-pociąg. Eksploatacyjnie oznacza to możliwość załadunku składu przy odległości H1. Przyjęto, że w rejonie załadunku pociąg będzie poruszał się z prędkością wleczną 2,5 km/h. Przy tej prędkości długość drogi hamowania pociągu jest pomijalna.

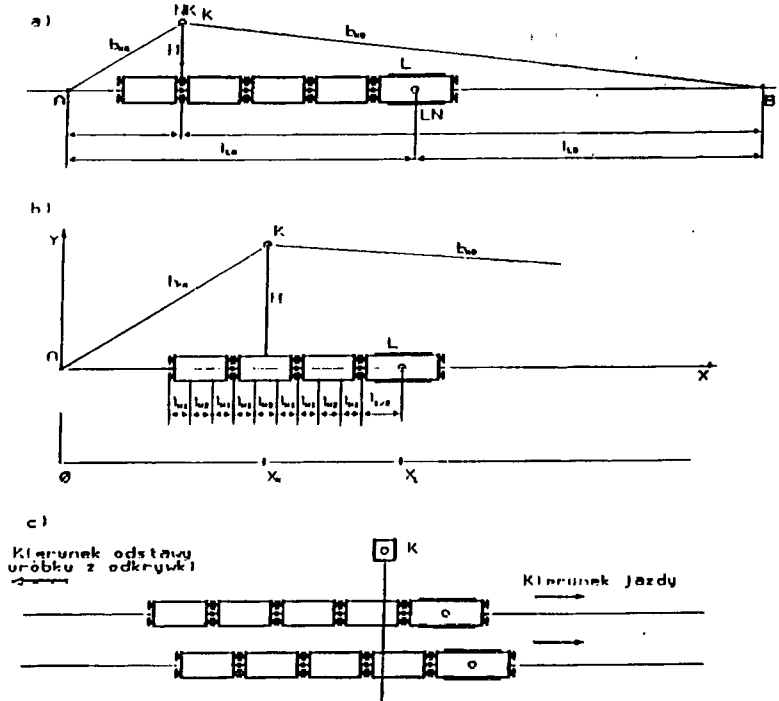
Napęd lokomotywy.

Silniki napędowe lokomotywy, schemat na rysunku 8, zasilane są poprzez sieć trakcyjną z zespołu zasilacza, w którego skład wchodzi transformator oraz prostownik nawrotny. Rozwiązanie takie pozwala na zasilanie silników lokomotywy napięciem stałym o regulowanej wartości. Istnieje możliwość hamowania odzyskowego i łatwego rewersowania kierunku jazdy. Lokomotywa jest wyposażona w układ pomiaru prędkości (T_p) oraz ogranicznik prędkości maksymalnej 20 km/h. Doświadczenia eksploatacyjne wskazują, że dla uzyskania prędkości minimalnej pociągu wystarczy utrzymanie napięcia sieci trakcyjnej na odpowiednim poziomie. Gdy zachodzi potrzeba, istnieje możliwość zadawania prędkości jazdy pociągu, wtedy należy przesyłać drogą radiową sygnał o aktualnej prędkości jazdy pociągu do układu sterowania prostownika nawrotnego.

Struktura algorytmu sterowania.

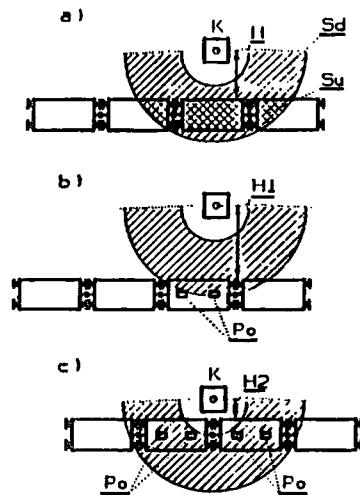
Na rysunku 9 pokazano strukturę algorytmu sterowania pociągu w rejonie załadunku urobku. Po sygnale START układ oczekuje na wprowadzenie do komputera danych o położeniu punktów A, B. Położenie tych

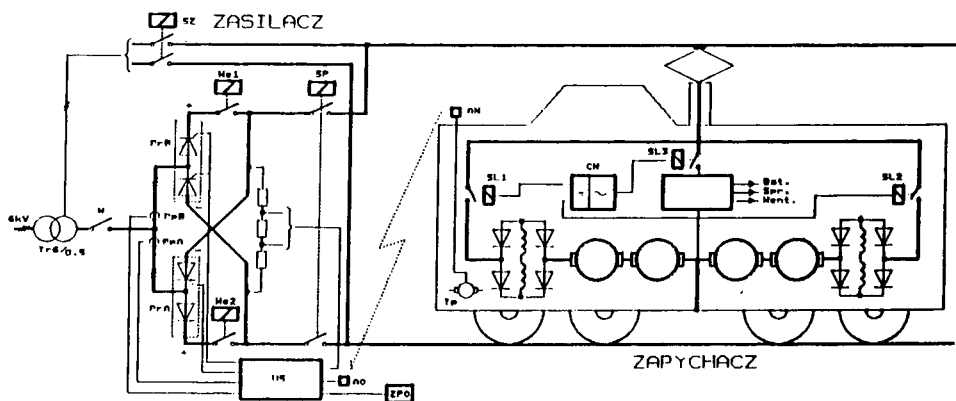
punktów zmienia się co pewien czas, ponieważ wraz z postępem robót następuje przesuwanie torowiska. Układ oczekuje na pojawienie się lokomotywy dla odczytania odległości od punktów A i B. Gdy odległość ta będzie równa pewnej wartości minimalnej (l_{\min}) następuje wczytanie pozostałych danych koniecznych do wyznaczenia położenia koparki (x_K) i lokomotywy (x_L). Z kolei układ oczekuje na sygnał informujący o H_{\min} (np. $H < 9$ m) co oznacza, że lokomotywa znalazła się w bliskim sąsiedztwie koparki. Po spełnieniu warunku $x_L = P$ wysyłany jest rozkaz załadunku m łyżek do wagonu. Po zakończeniu ładowania pierwszej części wagonu następuje przesunięcie składu pociągu. Przez cały czas jazdy sprawdzane jest wzajemne położenie koparki i lokomotywy. Gdy spełniony jest warunek $x_L = Q$ następuje zatrzymanie pociągu i załadunek n łyżek do drugiej części tego samego wagonu. W ten sam sposób odbywa się ładowanie kolejnych wagonów. Jeżeli w czasie załadunku okaże się, że $H > H_{\max}$ (np. $H > 20$ m) oznacza to, że został załadowany już ostatni wagon. Wydany zostaje rozkaz zatrzymania lokomotywy i zmiany kierunku jej jazdy w stronę rejonu rozrządu. Jeśli lokomotywa przejedzie poza punkt A na odległość l'_{\min} ($l'_{\min} > l_{\min}$) wydany zostaje rozkaz zwiększenia prędkości - skład opuszcza rejon załadunku.



rys.6. Wyznaczenie
położeń pociągu e1.

rys.7. Strefa bezpo-
średniego ładowania
wagonów.





Rys. 8. Napęd i sterowanie bezpośrednie lokomotywy el. pociągu odstawczego.

