

Andrzej Kluza

Katedra Ekonometrii i Informatyki, SGGW

Model sieciowy wykorzystania maszyn rolniczych przy wykonywaniu prac agrotechnicznych

Wstęp

Opracowanie przedstawia próbę modelowania sytuacji wykorzystania maszyn rolniczych w celu wyznaczenia optymalnego składu parku maszynowego gospodarstwa rolniczego za pomocą rozwiązania sieciowego zadania optymalizacji. Kryterium optymalizacji stanowi najmniejszy całkowity koszt wykonania zabiegów agrotechnicznych. Optymalizacji indywidualnego [6, 7] i zespołowego [2, 4] wykorzystania parku maszynowego dokonuje się najczęściej korzystając z różnorodnych odmian programowania liniowego [2]. Zastosowanie do tego celu programowania sieciowego ze względu na niektóre jego korzystne cechy, jak duża szybkość obliczeń i prostota modelu [1], może budzić nadzieje na stworzenie bardziej efektywnego narzędzia optymalizacji.

W pracy wykorzystano dane empiryczne zebrane w ramach tematu „System gromadzenia i przetwarzania danych na potrzeby doskonalenia i zarządzania gospodarstwami rolnymi” realizowanego przez Katedrę Ekonomiki i Organizacji Przedsiębiorstw Rolniczych SGGW [2].

Model relacji między obiektami

Elementami składowymi wykonywania prac agrotechnicznych są maszyny rolnicze, mające pewne ograniczone zasoby czasu pracy i określony koszt jednostkowy wykonania pracy, techniki wykonania zbiegów agrotechnicznych oraz obszary pól uprawnych, na których wykonuje się zabiegi.

Dane empiryczne zostały przeanalizowane i doprowadzono je do czwartej postaci normalnej relacyjnej struktury danych. Podstawą modelu sieciowego są wpływające stąd logiczne relacje jakościowe pomiędzy obiektami. Ustalenie zależności ilościowych jest uzależnione od konkretnego typu ścieżki wybranego do modelowania.

Dla uproszczenia w podanym poniżej modelu uwzględnia się jeden okres agrotechniczny, obejmujący od kilku do kilkudziesięciu dni zależnie od natężenia prac polowych.

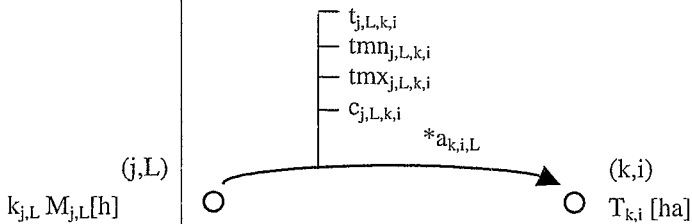
Maszyny rolnicze wykonujące prace polowe podzielono na grupy maszyn mogących wykonywać tę samą operację. Do grup maszyn należą trzy typy obiektów uniwersalnych: ciągniki, przyczepy i zasoby pracy własnej pracowników, oraz poszczególne typy maszyn roboczych wykonujących szczegółowe prace uprawowe, np. siewniki, sadzarki. Zabiegi agrotechniczne wykonywane są za pomocą poszczególnych technik uprawowych. Do wykonania jednej techniki trzeba pracy wielu typów maszyn jednocześnie. Dany zabieg agrotechniczny może być wykonany za pomocą różnych technik. Zapotrzebowanie na wykonanie zabiegu wyrażone w [ha] zaspokajane jest dzięki sumarycznemu wykonaniu prac polowych różnymi technikami.

Model łuku pracy maszyny rolniczej

W przypadku wykonywania prac agrotechnicznych można użyć analogii przepływu. Przepływać przez sieć może dostępny czas pracy od maszyn rolniczych do technik wykonania prac polowych, które z kolei zaspokajają zapotrzebowanie na wykonanie zabiegów agrotechnicznych ustalone dla poszczególnych pól zgodnie z planami agrotechnicznymi. Graf, na którego łukach określona jest wartość funkcji, nazywamy siecią. Funkcją opisana na łukach jest koszt jednostkowego czasu pracy maszyny. Przy uwzględnieniu powyższych założeń problem wykorzystania czasu pracy maszyn rolniczych można wyrazić jako problem najtańszego przepływu w sieci.

W celu przekształcenia przepływu z jednostek dostępnego czasu pracy maszyn rolniczych na jednostki powierzchni pól, na których wykonano pracę polową daną techniką, należy zastosować mnożnik na łuku przepływu pomiędzy maszyną a techniką dający możliwość konwersji jednostek przepływu czasu pracy maszyny [h] na wartość obszaru wykonanej pracy [ha], mający znaczenie wydajności pracy maszyny (rys. 1).

Łuk wykonania pracy przez daną maszynę opisany jest parą: $((j,L),(k,i))$, gdzie ciąg (j,L) oznacza węzeł początkowy, zaś ciąg (k,i) – węzeł końcowy w zbiorze połączeń transportowych U grafu G . Każda maszyna jako dostawca czasu pracy $k_{j,L}M_{j,L}$ [h] jest przedstawiona jako węzeł j i jest połączona z każdym węzłem techniki $T_{k,i}$ [ha], przedstawiającym wykonanie pracy w k -tej technice i -tego zabiegu.



Rysunek 1

Opis łuku sieci przepływowej pomiędzy węzłem przedstawiającym zasób czasu pracy maszyny a węzłem przedstawiającym wykonanie pracy polowej na danym obszarze za pomocą danej techniki

Źródło: Opracowanie własne.

Wprowadźmy oznaczenia:

j – numer maszyny w grupie maszyn, $j = 1, \dots, R_L$,

R_L – liczba maszyn w L -tej grupie maszyn,

$L = 1, \dots, S$ – numer grupy maszyn,

$k_{j,L}$ – stosunek wydajności j -tej maszyny z L -tej grupy maszyn do $j = 1$ pierwszej maszyny w tej grupie, mającej najmniejszą wydajność,

$M_{j,L}$ – ilość dostępnych zasobów czasu pracy [h] j -tej maszyny z L -tej grupy maszyn.

Wartości zasobów pracy poszczególnych maszyn jest przypisana do węzłów początkowych sieci.

Obszar pracy wykonanej przez maszynę w określonej technice przedstawiony jest iloczynem:

$$T_{k,i} [\text{ha}] = k_{j,L} M_{j,L} a_{k,i,L} [\text{h}][\text{ha/h}],$$

gdzie:

i – numer zabiegu agrotechnicznego, $i = 1, \dots, V$,

V – liczba wszystkich rodzajów zabiegów agrotechnicznych,

$k = 1, \dots, P_V$ – numer techniki agrotechnicznej,

$a_{k,i,L}$ – zapotrzebowanie k -tej techniki na czas pracy pierwszej maszyny z L -tej grupy maszyn przy wykonywaniu i -tego zabiegu agrotechnicznego [ha/h].

Zapotrzebowanie Z_i [ha] na określony zabieg agrotechniczny jest sumą zapotrzebowań na ten zabieg z poszczególnych pól.

Na łuku opisane są cztery wartości. Trzy z nich są dane:

$tmn_{j,L,k,i}$ – czas pracy maszyny [h] ustalony jako minimalny,
 $tmx_{j,L,k,i}$ – czas pracy maszyny [h] ustalony jako maksymalny,
 $c_{j,L,k,i}$ – koszt jednostkowy czasu pracy maszyny [zł/h].

W wyniku działania algorytmu sieciowego wyznaczana jest czwarta wartość, określona na łukach sieci między węzłem początkowym a końcowym:
 $t_{j,L,k,i}$ – czas pracy maszyny [h] pracującej w k -tej technice.

Dyskusja proporcjonalności przepływów pracy

Ogólny model ścieżki wykonania pracy maszyną rolniczą w danej technice, jaki przedstawiono na rysunku 1, nie uwzględnia całej złożoności operacji na danych empirycznych, wynikającej z rzeczywistego sposobu użytkowania maszyn rolniczych w czasie prowadzenia prac uprawowych.

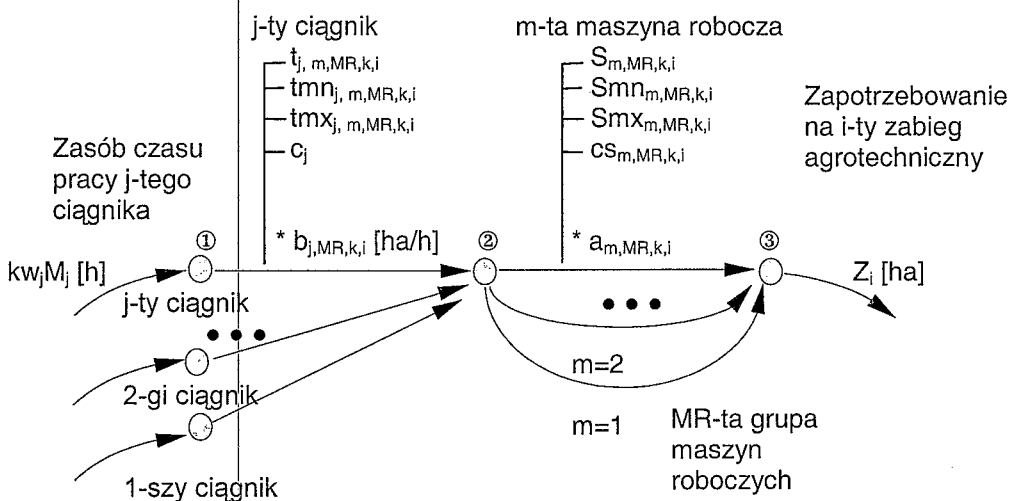
Na każdą z technik agrotechnicznych składa się praca różnych maszyn stanowiących zespół roboczy, składający się zwykle z ciągnika, maszyny roboczej i obsługi traktowanej jako „maszyna”. Każda z maszyn zużywa proporcjonalne ilości czasu pracy w stosunku do obszaru wykonywanej pracy. Wynika stąd wniosek, iż czas pracy maszyn z zespołu zużywany jest w niezmiennych proporcjach. W niektórych przypadkach czas pracy jednej maszyny, konieczny do wykonania pracy na 1 ha pola, różni się od takiego czasu pracy innej maszyny z zespołu. Występuje tu więc konieczność uwzględnienia proporcjonalności pomiędzy zużytkowanymi czasami pracy poszczególnych maszyn przy modelowaniu przepływów czasu pracy.

Gdyby do optymalizacji pracy maszyn użyć sieci mającej początki łuków wykonania pracy w węzłach zasobów pracy poszczególnych maszyn wchodzących do zespołu pracującego w danej technice, a końce łuków w węzłach zapotrzebowania na zabiegi, okazałoby się, że proporcjonalne wykorzystanie maszyn nie nastąpiłoby. Działłoby się tak dlatego, iż algorytm optymalizujący według najtańszego przepływu nie „widziałby” różnicy w korzystaniu z czasu pracy poszczególnych maszyn i wyznaczyłby zużycie czasu pracy maszyny o najmniejszym koszcie. Mogłoby się więc zdarzyć, że w pracy polowej miała by uczestniczyć tylko jedna maszyna robocza, bez obsługi i bez ciągnika. Aby

temu zaradzić, należy stworzyć taki model wykorzystania czasu pracy, który uwzględniałby proporcjonalne wykorzystanie czasu pracy maszyn wchodzących do zestawu.

Ścieżka wykonania pracy polowej

Pozioma ścieżka sieci na rysunku 2 reprezentuje wykonywanie i -tego zabiegu agrotechnicznego w k -tej technice z proporcjonalnym wykorzystaniem czasu pracy zespołu maszyn. Łuk ① ② ścieżki reprezentuje pracę ciągnika w zespole, a łuk ② ③ pracę zespołu: maszyna robocza, praca własna ludzi, ewentualnie przyczepa, oraz ewentualnie druga maszyna robocza.



Rysunek 2

Ścieżki sieci proporcjonalnego wykorzystania czasu pracy maszyn roboczych i ciągników wykonujących pracę k -tą techniką w i -tym zabiegu w ramach pracy w zespole maszyn

Źródło: Opracowanie własne.

W przypadku, gdy w MR-tej grupie maszyn roboczych znajduje się do dyspozycji więcej niż jedna maszyna oraz gdy do wykonywania prac w danej technice zdolny i dostępny jest więcej niż jeden ciągnik, dodajemy pozostałe ścieżki przepływu. Sumowanie pracy wszystkich ciągników odbywa się

w węźle ① w jednostkach obszaru [ha] wypracowanej przez ciągnik pracy polowej. Dzięki sumowaniu obszaru wykonywanej pracy uwzględnione są różne wydajności i koszty eksploatacji ciągników różnych typów mogących uczestniczyć w pracach w tej technice. Mnożnik $b_{j,MR,k,i}$ na łuku pomiędzy węzłami ① i ② stwarza proporcjonalność przepływu pomiędzy czasem pracy ciągnika a czasem pracy reszty maszyn z zespołu, zamieniając ilość czasu pracy ciągnika na liczbę ha powierzchni wykonanej pracy daną techniką przez ciągnik. Innymi słowy, aby do węzła ② dopłynął 1 ha możliwej do wykonania pracy w danej technice, z węzła ① musi wypłynąć tyle godzin [h] czasu pracy ciągnika, ile wynika z zapotrzebowania maszyny roboczej i przyczepy na pracę ciągnika w tej technice. Przy zapotrzebowaniu 10 h/ha na ciągnik ilość możliwej do wykonania pracy wynosi 0,1 ha na 1 h pracy ciągnika.

Łuki pomiędzy węzłami ② ③ reprezentują różne m-te maszyny z MR-tej grupy maszyn roboczych pracujące w zespołach roboczych w k-tej technice w celu wykonania i-tego zabiegu. Łączny obszar wykonania zabiegu poszczególnymi technikami jest sumowany w węźle ③.

Oznaczenia:

- M_j – dostępny czas pracy j-tego ciągnika [h],
- $t_{j,m,MR,k,i}$ – ilość czasu pracy ciągnika w k-tej technice wykonania i-tego zabiegu [h],
- kw_j – współczynnik wydajności j-tego ciągnika w stosunku do pierwszego ciągnika w grupie,
- c_j – koszt jednostkowym eksploatacji j-tego ciągnika [zł/h],
- $MR = 4, \dots, L$ – numer grupy maszyn roboczych, które nie są ciągnikami, przyczepami ani zasobami pracy własnej,
- L – liczba wszystkich grup maszyn.

Rozważmy pierwszy łuk ① ②. Aby ustalić proporcjonalność wykorzystania czasu pracy, przyjmijmy oznaczenia:

$Z_{Tm,MR,k,i}$ – jednostkowe zapotrzebowanie na czas pracy m-tej maszyny roboczej z MR-tej grupy maszyn przy wykonywaniu k-tą techniką i-tego zabiegu [h/ha],

$Z_{T2,k,i}$ – jednostkowe zapotrzebowanie na czas pracy przyczepy przy wykonywaniu k-tą techniką i-tego zabiegu [h/ha].

$ZC_{m,MR,k,i}$ – jednostkowe zapotrzebowanie m-tej maszyny roboczej z MR-tej grupy maszyn na czas pracy ciągnika przy wykonywaniu k-tą techniką i-tego zabiegu [h/h].

$ZC_{2,k,i}$ – jednostkowe zapotrzebowanie przyczepy na czas pracy ciągnika przy wykonywaniu k-tą techniką i-tego zabiegu [h/h].

Zapotrzebowanie maszyny roboczej na ciągnik wyrażone w godzinach pracy ciągnika na ha pracy polowej wynosi $ZT_{m,MR} ZC_{m,MR}$, dla przyczepy zaś $ZT_2 ZC_2$. W sumie w tej technice wykonywania pracy polowej na 1 ha wykonania pracy polowej potrzeba $ZT_{m,MR} ZC_{m,MR} + ZT_2 ZC_2$ godzin pracy ciągnika. Zatem ciągnik może wykonać $b_{j,MR,k,i} = \frac{1}{ZT_{m,MR,k,i} ZC_{m,MR,k,i} + ZT_{2,k,i} ZC_{2,k,i}}$ [ha]

pracy polowej w czasie 1 godziny swej pracy.

Całkowity czas pracy ciągnika $t_{j,m,MR}$ jest mnożony przez współczynnik $b_{j,MR,k,i}$ [ha/h], co daje wykonanie $S_{m,MR,k,i}$ hektarów wykonania pracy polowej w tej technice.

Łuk ② ③ ma znaczenie wykonywania pracy przez zespół maszyn bez uwzględnienia ciągnika. Łuk modelujący wykonywanie przez m-tą maszynę z MR-tej grupy maszyn k-tej techniki w i-tym zabiegu agrotechnicznym wychodzi z węzła maszyny roboczej ② i kończy się w węźle ③ reprezentującym i-ty zabieg Z_i . Maksymalny posiadany zasób czasu pracy tej maszyny $tmx_{m,MR,k,i}$ jest ustalany przez ograniczenie górne przepływu łuku ② ③:

$$Smx_{m,MR,k,i} = \frac{tmx_{m,MR,k,i}}{ZT_{m,MR,k,i}} \text{ [ha]}$$

Koszt jednostkowy $cs_{m,MR,k,i}$, jakim jest obciążony przepływ obszaru pracy maszyn w zespole z wyłączeniem ciągnika $S_{m,MR,k,i}$, jest sumą kosztów jednostkowych zużycia czasu pracy własnej, kosztu eksploatacji maszyny roboczej i kosztu eksploatacji przyczepy, o ile jest ona wykorzystywana w tej technice. Koszt ten jest obliczany w złotych na ha wykonanej pracy:

$$cs_{m,MR,k,i} = c_{1pw} ZTp_{w,k,j} + c_{m,MR} ZT_{m,MR} + c_2 ZT_2,$$

gdzie:

$ZTp_{w,MR}$ – jednostkowe zapotrzebowanie na czas pracy ludzkiej przy wykonywaniu k-tą techniką i-tego zabiegu [h/ha].

c_{1pw} – jednostkowy koszt czasu pracy własnej pracowników rolnych [zł/h],

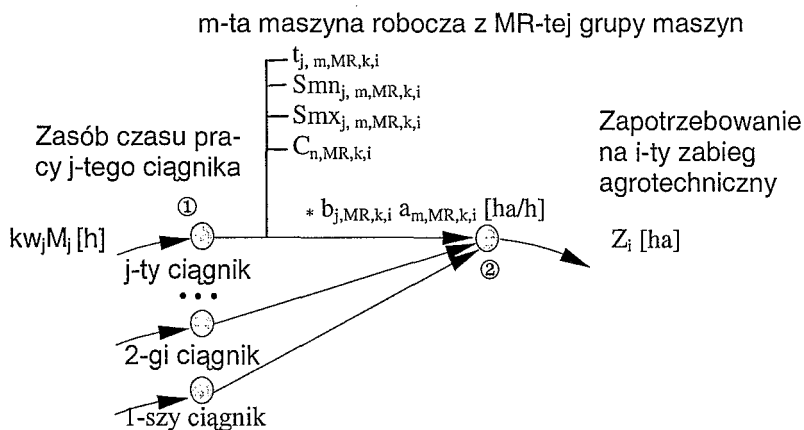
$c_{m,MR}$ – jednostkowy koszt eksploatacji maszyny roboczej [zł/h],

c_2 – jednostkowy koszt eksploatacji przyczepy [zł/h].

Po węźle reprezentującym zasoby czasu pracy maszyny roboczej na łuku dochodzącym do węzła zabiegu agrotechnicznego występuje mnożnik przepływu na łuku $a_{m,MR,k,i}$. Maszyna robocza posiadająca większą wydajność niż pierwsza maszyna z MR-tej grupy maszyn ma możliwość wykonać $kw_{m,MR}$ więcej pracy. Stąd mnożnik przepływu obszaru pracy:

$$a_{m,MR,k,i} = kw_{m,MR}$$

Większość maszyn ma zastosowania w wielu technikach. W tym przypadku można utworzyć ścieżki pracy maszyn bez możliwości bilansowania czasu ich pracy przez wykonujący optymalizację algorytm (rys. 3).



Rysunek 3

Ścieżki proporcjonalnego wykorzystania czasu pracy maszyny roboczej z niebilansowanym czasem pracy i ciągnika w zespole roboczym w k-tej technice i-tego zabiegu agrotechnicznego

Źródło: Opracowanie własne.

Pracę maszyny niebilansowanej wraz z pracą własną i ewentualnie przyczepą symbolizuje łuk ① ②. Jedynymi dostępnymi ograniczeniami są dolne i górne ograniczenie obszaru wykonanych prac w technice: $S_{mn_{j,m,MR,k,i}}$, $S_{mX_{j,m,MR,k,i}}$. Bilans całego zaplanowanego przez algorytm czasu pracy maszyny można porównać z dostępnym czasem pracy maszyn tego typu już po dokonaniu obliczeń. Jednak jest niemożliwe nadanie warunku, aby algorytm czerpał z zapasów czasu pracy takiej maszyny tylko do określonej wartości. Uwzględ-

niając technikę z niebilansowaną maszyną, można otrzymać rozwiązania uwzględniające wykonywanie prac bez ograniczeń lub niewykonywanie ich wcale.

$$C_{n,MR,k,i} = \frac{c_j (ZT_{m,MR,k,i} ZC_{m,MR,k,i} + ZT_{2,k,i} ZC_{2,k,i}) + c_{m,MR} ZT_{m,MR,k,i} + c_2 ZT_{2,k,i} + c_{pw} ZT_{pw,k,i}}{ZT_{m,MR,k,i} + ZT_{2,k,i}}$$

Oznaczenia:

$C_{n,MR,k,i}$ – koszt jednostkowy wykonywania pracy przez zespół z n-tą niebilansowaną maszyną z MR-tej grupy przy pracy w k-tej technice i-tego zabiegu [zł/h],

gdzie:

$ZC_{m,MR,k,i}$ – zapotrzebowanie m-tej maszyny z MR-tej grupy na pracę ciągnika przy pracy w k-tej technice i-tego zabiegu [h/h],

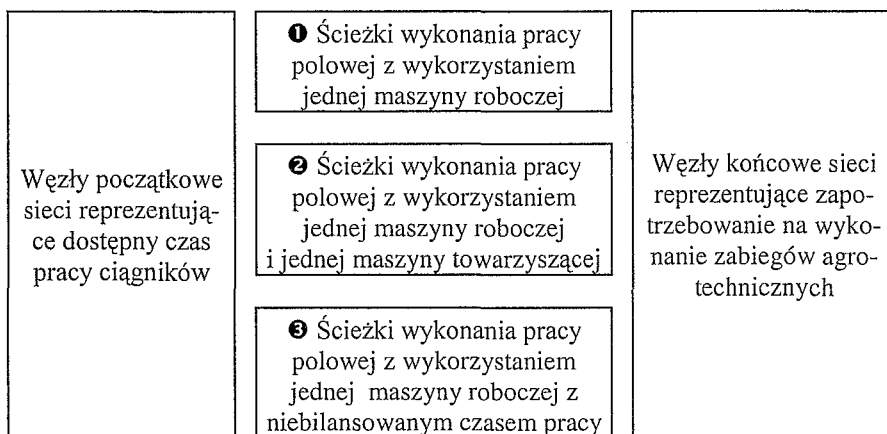
$ZC_{2,k,i}$ – zapotrzebowanie przyczepy na pracę ciągnika przy pracy w k-tej technice i-tego zabiegu [h/h].

Zbiorczy model sieciowy

Zbiorczy model sieciowy wykonywania zabiegów agrotechnicznych (rys. 4) składa się ze wszystkich typów ścieżek, rozpoczynających się w węzłach dostępnego czasu pracy wszystkich posiadanych ciągników i kończących się w węzłach sumujących wykonane prace polowe w obrębie danego zabiegu agrotechnicznego. Maszyny robocze mogące mieć zbilansowany czas pracy są modelowane ścieżkami typu ❶, Maszyny o bilansowanym czasie pracy pracujące wraz z maszynami niebilansowanymi są modelowane ścieżkami typu ❷. Maszyny robocze pracujące w wielu technikach w ciągu danego okresu agrotechnicznego modelowane są za pomocą ścieżek typu ❸. Poszczególne techniki wykonywania jednego zabiegu agrotechnicznego mogą być modelowane różnymi typami ścieżek przepływu, w zależności od tego, jakie maszyny będą użyte i w jakiej konfiguracji.

Otrzymany model został zweryfikowany i rozwiązany za pomocą oprogramowania optymalizującego sieci uogólnione [3] na podstawie danych empirycznych. Warianty obliczeń obejmowały ustalenie możliwości obniżenia kosztów mechanizacji przy zespołowym użytkowaniu maszyn. Wyliczone obniżenie kosztów wahało się od 12 do 25% całkowitych kosztów prac mechanizacyjnych. Ta wartość mieści się w przedziale do maksimum 30%, będącym

typowym rezultatem otrzymywanym z użyciem optymalizacji z zastosowaniem programowania liniowego [2], badań analitycznych [4], oraz jako wartość rzeczywistych rezultatów w rolnictwie niemieckim [4]. Pozytywny wynik obliczeń może potwierdzać użyteczność zaprezentowanego modelu.



Rysunek 4

Zbiorczy model sieci wykonywania zabiegów agrotechnicznych

Źródło: Opracowanie własne.

Model sieciowy wykorzystania maszyn oparty jest na prostej strukturze, lecz jego konstrukcja optymalizacji jest skomplikowana, a obsługa programu optymalizacyjnego jako aplikacji laboratoryjnej wymaga dużego nakładu pracy. Sam algorytm optymalizacji sieciowej odznacza się zaś dużą prędkością obliczeniową w odróżnieniu, od algorytmów rozwiązujących zadania programowania liniowego.

Literatura

1. AHUJA R.K., MAGNANTI T.L., ORLIN J.B., 1993: *Network Flows. Theory, Algorithms, and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
2. BORKOWSKI B., 1994: Metoda racjonalnego wykorzystania maszyn rolniczych w gospodarstwach chłopskich z zastosowaniem pakietu programowego MSERVICE/4. *Rozprawy Naukowe i Monografie*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

3. CURET N., 1998: Implementation of a Steepest-Edge Primal-Dual Simplex Method for Network Linear Programs. *Annals of Operations Research* 81: 251–270.
4. KADNER K., 1995: *Zespołowe użytkowanie maszyn rolniczych. Doradztwo specjalistyczne. Podręcznik doradcy*. Messel.
5. MUZALEWSKI A., WÓJCICKI Z., 2000: *Ekonomiczno-organizacyjne aspekty zespołowego użytkowania maszyn rolniczych*. Warszawa, IBMER.
6. PAWLAK J., 1997: *Dobór maszyn i ich racjonalne użytkowanie*. IBMER, Warszawa.
7. WÓJCICKI Z., 1996: *Wyposażenie rolnictwa w środki techniczne – stan i kierunki przemian w układzie sektorowym i regionalnym*. IBMER, Warszawa.

Generalized network model of agriculture machinery operation

Abstract

Some of ways of reducing farm machines operating costs are rational machinery assemblage composition and optimal farm jobs assignment. Optimization solution for this tasks can be done by solving network programming task. Relations between machines and field work lead to a relational database data model. A basic generalized network path of many machines working simultaneously is created, and all quantitative dependencies are established. Depending on field work type three types of path are identified, and incorporated into final cumulative network model. This structure has served the autor for optimization calculations on real empirical data, which can attest usefulness of the model.