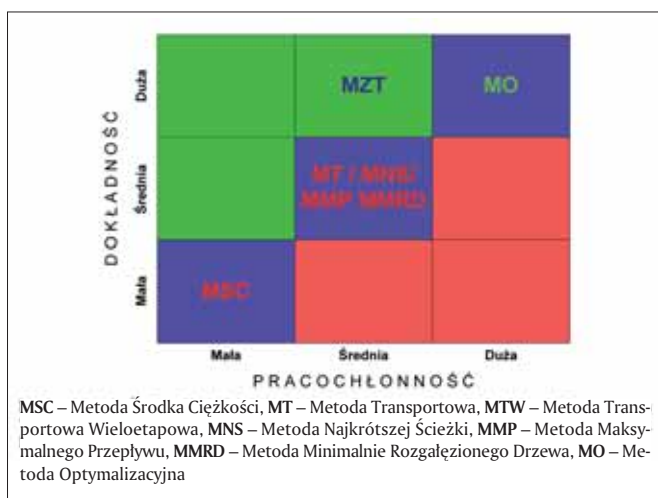


Agnieszka Hodczak-Sekulska  
Adam Redmer<sup>1</sup>

## Planowanie optymalnego rozwoju sieci dystrybucji na przykładzie sieci handlowych (cz. 2)

W pierwszej części artykułu Agnieszki Hodczak-Sekulskiej i Adama Redmera na rysunku 1 zabrakło oznaczeń poszczególnych metod w wybranych polach. Obecnie publikujemy pełną wersję tego rysunku, przepraszając zarazem Autorów i Czytelników za zaistniałą sytuację.

Redakcja



Rys. 1. Ocena relacji pracochłonności dokładności i uniwersalności metod pozwalających na optymalizację struktury sieci dystrybucji.  
Źródło: opracowania własne.

Następnym krokiem optymalizacji jest zbudowanie matematycznego modelu analizowanego problemu. Na proponowany model matematyczny składają się:

- zmienne decyzyjne  $x_{ij}$ , które określają przyporządkowanie do  $i$ -tego magazynu  $j$ -tego obiektu obsługiwanego przez ów magazyn, gdzie obiektem może być obszar (na przykład województwo) lub konkretny klient (na przykład sklep), zmienne decyzyjne przyjmują różne wartości w każdym z dwóch modeli optymalizacyjnych:

Zmienne decyzyjne – model wstępny:

$$x_{ij} = 1 \text{ gdy dane województwo } j \text{ obsługiwane jest przez magazyn } i, \quad (1)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ w przeciwnym przypadku.} \quad (2)$$

Zmienna decyzyjna – model główny:

$$x_{ij} = i \text{ gdy sklep } j \text{ obsługiwany jest przez magazyn } i, \\ x_{ij} = 0 \text{ w przeciwnym przypadku.}$$

Dla  $i = 1, 2, \dots, m$  ( $m$  = maksymalna liczba magazynów),  $j = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  = maksymalna liczba obiektów obsługiwanych przez magazyny)

- funkcja celu, określona wzorem 4

$$\min TDC = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} C_{ij} D_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} T m_i D_j + \sum_{i=1}^n T_i y_i \quad (3)$$

gdzie:

$TDC$  – całkowite koszty dystrybucji [zł/rok],

$D_j$  – roczne zapotrzebowanie poszczególnych obiektów  $j$  [EUR/rok] (1EUR = europaleta),

$C_{ij}$  – koszt transportu 1 EUR z magazynu  $i$  do obiektu  $j$  [zł/EUR],

$T m_i$  – koszt przejścia 1 EUR przez magazyn  $i$  [zł/EUR],

$T_i$  – stałe, roczne koszty utrzymania jednego magazynu  $i$  [zł/rok],

$y_i$  – wielkość pomocnicza wynosząca [-]:

$y_i = 1$  gdy magazyn  $i$  jest wykorzystywany w sieci dystrybucji, (4)

$y_i = 0$  w przeciwnym przypadku. (5)

przy ograniczeniach:

- każdy z obiektów (województwa / sklepy)  $j$  będzie obsługiwany dokładnie przez jeden magazyn  $i$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \text{ dla } i=1,2,\dots,m \quad (6)$$

- każdy z magazynów jest w stanie zaspokoić potrzeby wszystkich przyporządkowanych do niego obiektów, to znaczy że bez względu na liczbę obsługiwanych obiektów dany magazyn zdoła zaspokoić każdą wielkość popytu.

Na złożoność analizowanego problemu optymalizacji sieci dystrybucji wpływają następujące czynniki:

- rozważane jest 16 potencjalnych lokalizacji magazynów w różnych województwach; jako symboliczne miejsca lokalizacji każdego z magazynów przyjęto miasta wojewódzkie: Białystok, Bydgoszcz, Gdańsk, Gorzów Wielkopolski, Katowice, Kielce, Kraków, Lublin, Łódź, Olsztyn, Opole, Poznań, Rzeszów, Szczecin, Warszawa, Wrocław
- liczba zmiennych decyzyjnych:
  1. w etapie 1 (wstępnym) zdefiniowano 192 zmienne decy-

<sup>1</sup> Agnieszka Hodczak-Sekulska, e-mail: pennie@interia.pl. Dr inż. Adam Redmer (adam.redmer@put.poznan.pl) jest adiunktem w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej. Zajmuje się profesjonalnie projektowaniem sieci dystrybucji z wykorzystaniem narzędzi optymalizacji i posiada w tym zakresie doświadczenie praktyczne. Artykuł recenzowany (przyp. red.).

5 magazynów									
Lokalizacje sklepów	Lokalizacje magazynów						1	Który magazyn przydzielono	
	Wielkopolskie	Pomorskie	...	Łódzkie	Mazowieckie	Śląskie			
	Poznań	Gdańsk	...	Łódź	Warszawa	Katowice			
Lubuskie	1	0	0	0	0	0	1		
Wielkopolskie	1	0	0	0	0	0	1		
Dolnośląskie	1	0	0	0	0	0	1		
Pomorskie	0	1	0	0	0	0	1		
Zachodniopomorskie	1	0	0	0	0	0	1		
Kujawsko-Pomorskie	0	1	0	0	0	0	1		
Łódzkie	0	0	0	1	0	0	1		
Małopolskie	0	0	0	0	0	1	1		
Mazowieckie	0	0	0	0	1	0	1		
Opolskie	0	0	0	0	0	1	1		
Śląskie	0	0	0	0	0	1	1		
Warmińsko-Mazurskie	0	0	0	0	1	0	1		
Podlaskie									
Świętokrzyskie									
Podkarpackie									
Lubelskie									
suma	4	2	...	1	2	3	12	suma	

Rys. 2. Fragment tablicy zmiennych decyzyjnych – model wstępny. Źródło: opracowanie własne.

zyczne  $x_{ij}$ , gdzie  $192 = 12$  (województw, w których działają sklepy)  $\times$  16 (miast, jako potencjalne lokalizacje magazynów); zmienne decyzyjne przyjmują wartości binarne, 2. w etapie 2 (głównym) zdefiniowano 177 zmiennych decyzyjnych  $x_{ij}$  (średnia liczba sklepów, jakie posiadają sieci handlowe działające na terenie Polski), za pomocą których przyporządkowano każdy ze sklepów do konkretnego magazynu; zmienne mogą przyjmować wartości od 1 do 16 w zależności od numeru magazynu, który ma dany sklep zaopatrywać.

W efekcie, aby możliwe było zastosowanie ogólnie dostępnych narzędzi optymalizacyjnych, problem rozwiązano dwu-etapowo, co uprościło obliczenia. Podział taki nie jest jednak konieczny z metodycznego punktu widzenia. Postępowanie w każdym z etapów optymalizacji było następujące:

- a) Etap wstępny – określenie miejsc lokalizacji magazynów oraz przyporządkowanie im do obsługi województw, w których działają sklepy. Na miejsca lokalizacji magazynów wybrano miasta wojewódzkie. Dlatego w tym etapie posługiwano się już konkretnymi nazwami miast, w których mają powstać ewentualne magazyny. Natomiast popyt wszystkich sklepów prowadzących działalność w poszczególnych województwach został zagregowany do poziomu województw. Fragment tablicy zmiennych decyzyjnych zamieszczono na rysunku 2.

**Generowanie rozwiązań:** za pomocą narzędzia Solver MS Excel przeprowadzono obliczenia dla 12 możliwych wariantów sieci dystrybucji. Polegało to na tym, że liczbę magazynów wprowadzono jako jedno z ograniczeń i podczas kolejnych powtórzeń procesu optymalizacji liczba ta zmieniała się od 1 do 12. W ten sposób otrzymano wyniki dla każdej potencjalnej liczby magazynów z przedziału 1 do 12 (w tylu województwach operuje typowa sieć handlowa). Wyniki te obejmowały: miejsca powstania magazynów oraz przyporządkowanie woje-

wództw, w których działają sklepy do tak zdefiniowanych magazynów.

- b) Model główny – znalezienie optymalnego przyporządkowania każdego ze sklepów do konkretnego magazynu. Do tego celu wykorzystano wyniki uzyskane w modelu wstępnym. Znane więc były lokalizacje magazynów dla każdego z wariantów sieci dystrybucji (przyjęto, że obszary obsługi każdego magazynów, zdefiniowane wstępnie w poprzednim etapie na potrzeby wyznaczenia ich lokalizacji, stanowią ponownie element optymalizacji, tym razem na poziomie sklepów, a więc dokładniej niż poprzednio). Tablica zmiennych decyzyjnych ma inną postać, niż w modelu wstępnym i została zaprezentowana na rysunku 3.

ZAPOTRZEBOWANIE [EUR/rok]	LOKALIZACJE MAGAZYNÓW		NR MAGAZYNU	1	Który magazyn przydzielono?
2114.43	Lubuskie	Drezdenko	1		
25133.77	Lubuskie	Gorzów Wielki	1		
14242.47	Wielkopolskie	Gniezno	1		
2353.80	Wielkopolskie	Grodzisk Wielki	1		
2732.80	Dolnośląskie	Brzeg Dolny	1		
1117.06	Dolnośląskie	Duszniki Żyrardów	1		
...	...	...	...	...	
5964.28	Małopolskie	Bochnia	11		
8377.92	Małopolskie	Chrzanów	11		
2453.53	Mazowieckie	Włocławek	11		
9475.03	Mazowieckie	Ciechanów	11		
7679.76	Opolskie	Brzeg	11		
2792.64	Opolskie	Głubczyce	11		
35905.38	Śląskie	Bierkowo-Biała	11		
24335.87	Śląskie	Chorzów	11		
4208.91	Warmińsko-Mazurskie	Olsztyn	11		
25931.67	Warmińsko-Mazurskie	Elbląg	11		

Rys. 3. Fragment tablicy zmiennych decyzyjnych – model główny. Źródło: opracowanie własne.

**Generowanie rozwiązań:** w etapie tym, podobnie jak w etapie wcześniejszym, przeprowadzono obliczenia dla wszystkich 12 wariantów (od 1 do 12 magazynów). Wszystkim z analizowanych wariantów wprowadzono rozwiązanie wejściowe, będące wynikiem modelu wstępnego. Polegało to na tym, że dla konkretnego wariantu do tablicy zmiennych decyzyjnych każdemu ze sklepów wpisywano numer magazynu zgodnie z przydziałem z modelu wstępnego (budowa rozwiązania początkowego). We wszystkich wariantach Evolver dokonał takich zmian w przyporządkowaniu sklepów do magazynów z rozwiązania wejściowego, aby wyrażona wzorem 3 suma kosztów transportu i magazynowania była jak najmniejsza. W niektórych przypadkach Evolver zmienił wstępne przyporządkowanie sklepów do magazynów położonych nawet w tych samych województwach co sklep, na magazyn z innego województwa, ponieważ odległość tych sklepów do magazynów zlokalizowanych w innych województwach okazała się krótsza.

## Analiza uzyskanych wyników

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano optymalną, bazującą na 5 magazynach strukturę analizowanej sieci dystrybucji. Gdzie każdy sklep sieci został przydzielony do konkretnego magazynu, którego lokalizację wyznaczono w taki sposób, aby suma kosztów transportu oraz magazynowania była najmniejsza. W tabeli 2 zestawiono województwa z nazwami miast, w których powstaną magazyny (lokalizacje symboliczne) oraz liczbę sklepów przyporządkowanych do tych magazynów.

Optymalną strukturę typowej sieci dystrybucji z zaznaczeniem miejsc lokalizacji magazynów (kolor czerwony) oraz województw objętych działalnością każdego z magazynów zaprezentowano na rysunku 4.

Na rysunku 4 umieszczono punkty (kolor czarny), które przedstawiają lokalizację magazynów aktualnie istniejącej typowej sieci dystrybucji sieci handlowych funkcjonującej w Polsce. Porównanie punktów czarnych i czerwonych pozwala określić różnice w liczbie oraz lokalizacji magazynów rzeczywistej (kolor czarny) i optymalnej (czerwony) sieci dystrybucji. Z rysunku wynika, iż typowe lokalizacje dwóch magazynów (kolor czarny), które otrzymano na podstawie analizy struktury sieci dystrybucji 12 sieci handlowych, pokrywają się z lokalizacją dwóch magazynów (kolor czerwony), otrzymanych jako wynik optymalizacji. Magazyny te znajdują się w województwach: Mazowieckim (Warszawa) oraz w Wielkopolskim (Poznań). Szczegółową charakterystykę porównawczą rzeczywistej i optymalnej sieci dystrybucji sieci handlowej prezentuje tabela 3.

Tab. 2. Optymalna struktura typowej sieci dystrybucji sieci handlowej działającej w Polsce – rozwiązanie optymalne – model główny. Lokalizacja magazynów

Lokalizacja magazynów		Numer magazynu	Liczba sklepów przyporządkowanych do magazynu
Województwo	Miasto		
Wielkopolskie	Poznań	2	69
Pomorskie	Gdańsk	4	31
Łódzkie	Łódź	7	13
Mazowieckie	Warszawa	9	25
Śląskie	Katowice	11	39
SUMA:			177

Źródło: opracowanie własne.

Porównując strukturę typowej i optymalnej sieci dystrybucji można wnioskować, że:

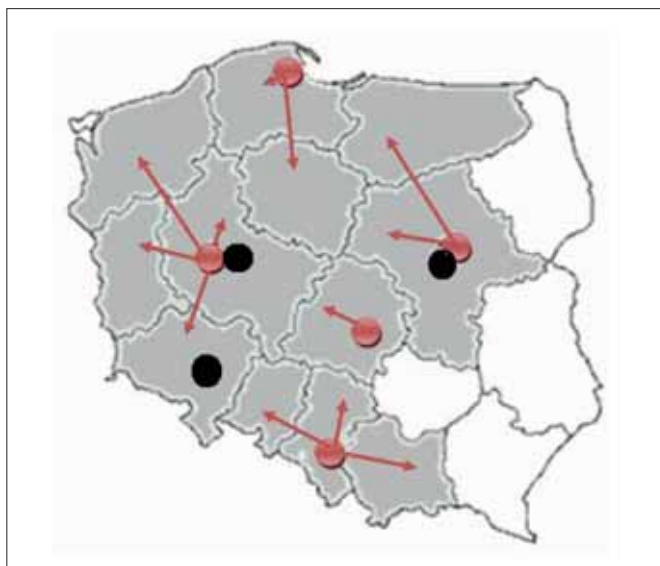
- optymalna struktura typowej sieci dystrybucji powinna bazować na 5 magazynach, natomiast w aktualnie istniejącej strukturze sieci istnieją zazwyczaj 2 lub 3 magazyny
- dwie lokalizacje magazynów w obu przypadkach są takie same (Woj. Mazowieckie i Wielkopolskie), co potwierdza to,

Tab. 3. Porównanie rzeczywistej i optymalnej struktury typowej sieci dystrybucji sieci handlowej działającej w Polsce.

Postać typowej sieci dystrybucji		
Cecha	przed optymalizacją	po optymalizacji
Średnia powierzchnia sklepu [mkw.]	1 974	1 974
Liczba sklepów	177	177
Liczba magazynów	2/3	5
Lokalizacje magazynów	Mazowieckie, Wielkopolskie, i/lub Dolnośląskie	Mazowieckie (Warszawa), Wielkopolskie (Poznań), Śląskie (Katowice), Łódzkie (Łódź) i Pomorskie (Gdańsk)
Liczba województw objętych działalnością	12	12
Magazyn własny	Nie	Nie
Magazyn obcy	Tak	Tak
Własna baza transportowa	Nie	Nie
Własna baza naczep	Nie	Nie
Obsługa zewnętrznej firmy transportowej	Tak	Tak
Całkowite koszty dystrybucji [PLN/rok]	88 833 104	77 765 567 (- 12%)
Całkowite koszty transportu [PLN/rok]	38 333 104	21 265 567 (- 44%)
Całkowite koszty magazynowania [PLN/rok]	50 500 000	56 500 000 (+11%)
Gdzie: „-” oznacza spadek natomiast „+” wzrost wartości kosztów po optymalizacji.		

Źródło: opracowanie własne.





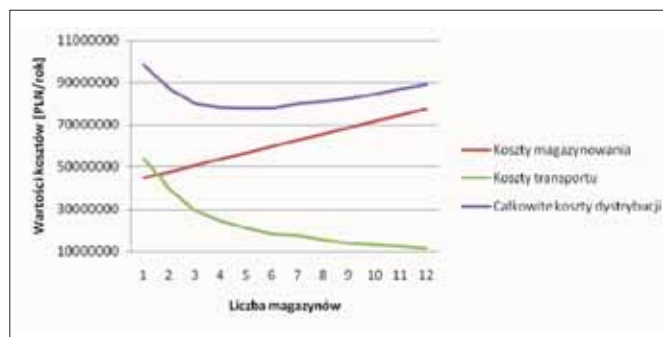
Rys. 4. Optymalna struktura typowej sieci dystrybucji sieci handlowej działającej w Polsce – rozwiązanie optymalne – model główny.  
Źródło: opracowanie własne.

że lokowanie magazynów w tych województwa jest uzasadnione i perspektywiczne (pozwala na prawidłowy rozwój sieci dystrybucji w przyszłości)

- trzecia, sugerowana w wyniku optymalizacji lokalizacja, to Katowice, która wydaje się być prawidłowa; z wcześniejszych rozważań wynika, że 2 spośród 12 sieci handlowych zlokalizowało tam właśnie swoje magazyny.

Jak widać z przedstawionych w tabeli 3 wartości, koszty w wyniku optymalizacji uległy poprawie w dwóch przypadkach. Jednak logiczne jest, że jeżeli liczba magazynów uległa zwiększeniu, to koszty magazynowania automatycznie wzrastają. Związane jest to ze stałymi kosztami utrzymania magazynów, które przyjęto na poziomie 3 mln zł. rocznie na jeden magazyn, i które w efekcie zmiany liczby magazynów z 3 do 5 spowodowały wzrost kosztów magazynowania o 6 mln zł., czyli o około 11% (zmianie nie uległy łączne koszty przejścia wyrobów przez magazyny).

W przypadku kosztów transportu mamy do czynienia z dużym spadkiem ich poziomu, rzędu 44%. Jest to efekt powsta-



Rys. 5. Zmiany kosztów dystrybucji i ich składowych (magazynowania i transportu) przy różnej liczbie magazynów wykorzystywanych w typowej sieci dystrybucji sieci handlowej działającej w Polsce.  
Źródło: opracowanie własne.

nia kolejnych dwóch magazynów i w konsekwencji skrócenia tras przewozowych (tras dostaw do sklepów). W rezultacie całkowite koszty dystrybucji po optymalizacji spadły o około 12%. W tej sytuacji bardziej opłacalne staje się utrzymanie kolejnych dwóch magazynów, niż kosztowny transport w przypadku posiadania trzech magazynów. Należy jednak w tym miejscu podkreślić, że założono, iż to dostawcy dostarczają towar do magazynów na koszt własny (koszt wliczony w cenę wyrobów), ponieważ w znacznej mierze z tym związany jest ten znaczny efekt kosztowy w transporcie. Ważne jest też, że poza korzystnym efektem kosztowym, następuje skrócenie tras przewozowych, co pozwala na szybsze, o ile to konieczne, częstsze i bardziej terminowe dostawy do sklepów.

Rysunek 5 prezentuje przebieg kosztów magazynowania i transportu oraz ich sumy, to jest całkowitych kosztów dystrybucji TDC dla różnych wariantów sieci dystrybucji, różniących się przede wszystkim liczbą oraz lokalizacją (czego na rysunku nie pokazano) magazynów. Optymalna liczba magazynów to 5. Ważne jest jednak, że optymalna relacja kosztów transportu do kosztów magazynowania w tym przypadku ma się jak 1: 2,7. Nieopłacalna jest też zbyt duża i zbyt mała liczba magazynów.

## Podsumowanie

Otrzymana w wyniku optymalizacji struktura typowej sieci dystrybucji sieci handlowej różni się od aktualnie funkcjonujących sieci dystrybucji. Po optymalizacji zmieniła się liczba magazynów (z 3 na 5) i częściowo ich lokalizacja. Dwa województwa, w których działają magazyny, są takie same zarówno przed, jak i po optymalizacji (Woj. Mazowieckie i Wielkopolskie). Nowy, optymalny układ sieci dystrybucji, skutkuje spadkiem całkowitych kosztów dystrybucji o 12%, przy spadku kosztów transportu o 44% oraz wzroście kosztów magazynowania o 11%. Wynika z tego, że – mimo iż koszty magazynowania wzrosły (wzrost liczby magazynów z 3 do 5) – to zmiana struktury sieci dystrybucji w znaczący sposób wpłynęła na spadek kosztów transportu, ponieważ zmniejszyły się odległości z magazynów do sklepów obsługiwanych przez sieć.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić jednoznacznie, że optymalizacja się opłaca. Jako główny powód inwestycji w projekty związane z usprawnianiem struktury sieci dystrybucji stawia się redukcję kosztów. Jednak obecnie, mimo, iż projekty takie mogą powodować znaczącą przewagę nad konkurentami lub poprawę poziomu obsługi klienta, sieci dystrybucji traktują te korzyści jako poboczne, a nie główne. Zdarza się tak, że po przeprowadzonym procesie optymalizacji nie widać skutków. Przyczyna tego problemu tkwi w tym, że firmy zamiast skupić się na źródłach powstawania kosztów, usuwają symptomy<sup>2</sup>.

W obecnych czasach sieci handlowe chcąc pozostać znaczącym konkurentem na polskim rynku będą musiały optymalizować strukturę swoich sieci dystrybucji, ponieważ prawidłowo zaplanowana pozwala na znaczne zmniejszenie kosztów, podnosząc jednocześnie jakość dystrybucji.

W całym procesie planowania rozwoju sieci dystrybucji należy uwzględnić formę własności magazynów, transportu, itd. Warto przeanalizować, czy bardziej opłaca się wynająć operatora logistycznego, czy też wybudować własny magazyn

<sup>2</sup> Kisperska-Moroń D.: *Systemy logistyczne w przedsiębiorstwie*, Akademia Ekonomiczna w Katowicach, Katowice, 1994.

i stworzyć własną bazę transportową. Jeżeli sieć handlowa zleci dystrybucję firmie zewnętrznej, pozbędzie się dużego kłopotu, a tym samym będzie mogła zająć się tym, co powinna robić najlepiej czyli handlem. Takie rozwiązanie niesie pewne zagrożenia ze strony firm outsourcingowych, ponieważ brak rzetelności może doprowadzić do pustych półek w sklepach, czyli strat dla sieci handlowej.

Bardzo trudno jest odpowiedzieć na pytanie: czy sieć handlowa powinna posiadać własną sieć dystrybucji, czy też zlecić cały ten proces firmie zewnętrznej? Pewne jest jedynie to, że sieci handlowe powinny tak dostosowywać swoją sieć dystrybucji, żeby generowały one jak najniższe koszty. Dla klienta nie jest ważne, czy towar przechowywany jest w magazynie własnym, czy obcym. Ważne jest natomiast, żeby był na czas i po jak najniższej cenie.

### Streszczenie

Istnieje wiele metod analizowania i optymalizacji struktury sieci dystrybucji. Metody te w większości przypadków wyrastają z tak zwanych badań operacyjnych. Wśród najbardziej znanych metod można wymienić metody: środka ciężkości, transportową jedno i wieloetapową, najkrótszej ścieżki, maksymalnego przepływu, minimalnie rozgałęzionego drzewa oraz metody optymalizacyjne. Artykuł prezentuje szeroki przegląd wymienionych metod w kontekście ich przydatności do optymalizacji struktury sieci dystrybucji. A w dalszej kolejności zastosowanie wybranej metody, to jest metody optymalizacyjnej, do analizy i weryfikacji typowej sieci dystrybucji sieci handlowych działających w Polsce.

Przeprowadzone analizy pokazują, że typowa sieć dystrybucji sieci handlowych bazuje na 2-3 magazynach zlokalizowanych w Województwie Mazowieckim oraz Wielkopolskim i/lub Dolnośląskim, a powinna korzystać z około 5 magazynów, zlokalizowanych w Województwie Mazowieckim, Wielkopolskim, Śląskim, Łódzkim i Pomorskim. Taka zmiana może przynieść obniżenie całkowitych kosztów dystrybucji o około 12%. Analizy przeprowadzono z wykorzystaniem solvera arkusza kalkulacyjnego MS Excel (wersja profesjonalna) oraz solvera Evolver firmy Palisade Corporation.

### Summary

Planning of an optimal development of a distribution network structure based on a trade networks example. There are many methods of analysis and optimization of a structure of a distribution networks. These methods in majority arise from an OR – Operational Research theory. Among the best known methods one can distinguish following ones: gravity centre, transportation, shortest path, maximum flow, minimum spanning tree and optimization method based on the mathematical programming theory. The article presents an essence and some comparison of the mentioned methods. And furthermore, an exemplary application of a one of the mentioned methods (an optimization method). It has been applied to analyze and verify an optimality of a typical distribution network of a trade networks operating in Poland. Carried out analysis showed that the typical distribution network based on 2/3 warehouses located in Mazovian as well as Great Poland and / or Lower Silesian voivodships should be changed into a 5-warehouse based network, with warehouses located in Mazovian, Great Poland, Silesian, Lodz and Pomerania voivodships. Such a change can results in a 12% savings of a total distribution costs to a trade networks. Carried out analysis and optimization has been done with a help of MS Excel professional version solver and Evolver of Palisade Corporation.