

MAREK MAGIERA

Wybrane metody planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne i łańcuchy dostaw

Streszczenie

W monografii przedstawiono opracowane przez autora metody służące do planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne, a także pomiędzy ogniwami łańcuchów dostaw – w tym pomiędzy zakładami produkcyjnymi. Dla zadań planowania przepływów produktów zbudowano nowe modele matematyczne oraz skonstruowano nowe koncepcje ich rozwiązywania. Efektem zastosowania zaprezentowanych metod są harmonogramy przepływów produktów. Część opracowanych metod służy nie tylko do budowy harmonogramów przepływów produktów, ale również do konfigurowania linii produkcyjnych (np. wyznaczenie liczby maszyn linii produkcyjnej, rozmieszczenie podajników części). Metody, przeznaczone do budowy harmonogramów przepływów przez łańcuchy dostaw, charakteryzują się możliwością selekcji dostawców, a także selekcji firm transportowych obsługujących ogniwa łańcucha dostaw.

Podstawowym narzędziem badań operacyjnych, stosowanym w opracowanych metodach, jest programowanie matematyczne. Zadania budowy harmonogramów przepływów produktów zostały sformułowane w postaci liniowych modeli z całkowitoliczbowymi zmiennymi. W rozwiązywaniu problemów związanych z budową harmonogramów przepływów produktów zastosowano podejście monolityczne lub hierarchiczne. W metodach opartych na podejściu monolitycznym wszystkie problemy cząstkowe rozwiązywane są równocześnie. Natomiast uwzględnienie podejścia hierarchicznego polega na podziale problemu globalnego na kolejno rozwiązywane zadania. W monografii porównano obie koncepcje rozwiązywania problemów, opisano ich wady i zalety.

Zaprezentowano metody służące do wyznaczenia rozwiązań dokładnych oraz przybliżonych, ze względu na zastosowane kryteria. Część metod przybliżonych opartych jest na podejściu hierarchicznym (wielopoziomowym), w przypadku którego odnośnie do poszczególnych poziomów zbudowano modele zadań programowania całkowitoliczbowego. Pewna grupa metod przybliżonych oparta jest natomiast na podejściu jednopoziomowym, w którym zastosowano technikę relaksacji. W monografii przedstawiono zalecenia dotyczące stosowania odpowiednich koncepcji metod.

Przedstawiona powyżej tematyka pracy uwidacznia, że monografia dotyczy **inżynierii produkcji**. Zagadnienia planowania produkcji i zarządzania systemami logistycznymi, ujęte w monografii, należą do tej dyscypliny naukowej. Zakres zagadnień, dotyczących planowania przepływów produktów przez łańcuchy dostaw o sieciowym charakterze, jest

charakterystyczny również dla **logistyki**. Zastosowane metody optymalizacyjne zalicza się do **badania operacyjnych**.

Celem pracy było opracowanie i zaprezentowanie metod, które umożliwiają rozwiązywanie praktycznych problemów za pomocą standardowych narzędzi badań operacyjnych. W rozwiązywaniu problemów optymalizacyjnych uwzględniono różnego rodzaju kryteria (czasowe, kosztowe). Opracowano również metody wielokryterialne. Cechą charakterystyczną zaprezentowanych metod jest uwzględnienie planowanych przestojów maszyn, dzięki czemu w budowanych harmonogramach przepływów produktów zarezerwowany jest czas m.in. na przebrojenia, remonty, konserwacje.

Poszczególne rozdziały służą do realizacji opisanego celu pracy. W rozdziale 1 przedstawiono podstawowe terminy i problematykę dotyczącą budowy harmonogramów przepływów produktów – zarówno przez linie produkcyjne, a także pomiędzy ogniwami łańcuchów dostaw. Opisane są konfiguracje linii produkcyjnych uwzględnione w opracowanych metodach. Zdefiniowane są również rodzaje marszrut produkcyjnych, których dotyczą budowane harmonogramy przepływów produktów. Scharakteryzowano podstawowe parametry harmonogramów przepływów produktów i zinterpretowano kryteria stosowane w budowie tych harmonogramów. Zawarty w tym rozdziale opis konfiguracji linii produkcyjnych obejmuje różne rodzaje maszyn, urządzenia pomocnicze, np.: bufory międzyoperacyjne, podajniki części. Zamieszczono wykaz podstawowych parametrów opisujących produkty, maszyny produkcyjne, bufory międzyoperacyjne. Wyszczególniono linie montażowe, opisano problematykę planowania montażu. W przypadku systemów produkcyjnych sformułowano zadanie budowy harmonogramów równoczesnych przepływów różnych typów produktów.

W rozdziale 1 podjęto również tematykę związaną z przepływami produktów przez łańcuchy dostaw o sieciowym charakterze. Sformułowano zadanie budowy harmonogramów równoczesnych przepływów różnego rodzaju produktów pomiędzy dwoma grupami ogniw: dostawcami i odbiorcami. Wyszczególniono podstawowe parametry opisujące dostawców, odbiorców, produkty, firmy transportowe i należące do nich środki transportu. Przedstawiono problematykę selekcji dostawców oraz selekcji firm transportowych uwzględnianą w podejmowaniu decyzji taktycznych dotyczących planowania przepływów przez łańcuchy dostaw. Wyszczególniono czynniki mające wpływ na wybór dostawców oraz firm transportowych. Scharakteryzowano kryteria i ograniczenia stosowane w budowie harmonogramów przepływów produktów przez łańcuchy dostaw. Opisano różne rodzaje elastyczności – dotyczące planowania przepływów przez łańcuchy dostaw (pomiędzy ogniwami tych łańcuchów), a także przepływów przez ogniwa tych łańcuchów – np. zakłady produkcyjne, do których należą m.in. linie produkcyjne.

W rozdziale 2 scharakteryzowano stosowane metody planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne oraz przez łańcuchy dostaw. Przedstawiono przegląd literatury dotyczącej planowania przepływów produktów. W przeglądzie tym wyróżniono metody oparte na koncepcji monolitycznej oraz metody hierarchiczne. Wyszczególniono te pozycje bibliografii, które zainspirowały autora niniejszej monografii do opracowania metod planowania przepływów produktów. Opisano cechy charakterystyczne tych metod, które odróżniają je od innych koncepcji. Przedstawiono również podstawy matematyczne stosowanych metod – oparto się tu na klasycznych zadaniach optymalizacji, do których należy zadanie transportowe czy zadanie

przydziału. Liniowe modele matematyczne, dotyczące wymienionych zadań, stanowią punkt wyjścia do budowy nowych modeli matematycznych służących do planowania przepływów produktów. W tych nowych modelach uwzględnianych jest relatywnie dużo parametrów, zmiennych i ograniczeń. Prezentacja opracowanych metod planowania przepływów produktów, w których zastosowano nowe modele matematyczne, zamieszczona jest w rozdziałach 3, 4 i 5.

Rozdział 3 poświęcony jest przedstawieniu metod zbudowanych w celu planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne. W metodach tych uwzględniono kryteria czasowe lub kosztowe. Wyróżniono tu metody opracowane dla linii produkcyjnych bez maszyn równoległych oraz metody dotyczące wielostadialnych linii produkcyjnych, w których każde stadium obejmuje zbiór maszyn pracujących równolegle. Wzięto pod uwagę linie produkcyjne z buforami międzyoperacyjnymi oraz linie produkcyjne bez tych magazynów lokalnych. W przypadku braku buforów międzyoperacyjnych w konfiguracji systemu produkcyjnego uwzględniono dwa przypadki. Pierwszy z nich umożliwia blokowanie maszyn przez produkty oczekujące na wykonanie kolejnych operacji. Oznacza to, że maszyny mogą pełnić rolę buforów. W drugim przypadku maszyny wykonują tylko operacje technologiczne i obowiązuje zakaz przerw pomiędzy operacjami dotyczącymi danego produktu. Jest to tzw. szeregowanie „bez czekania”. Szeregowanie rozumiane jest jako rozdział operacji w przestrzeni (przydział do maszyn) i w czasie. W rozdziale 3 wyróżniono również metody planowania przepływów produktów przez linie montażowe. Dodatkowym zadaniem, rozwiązywanym w przypadku linii montażowych, jest rozdział podajników części. W przypadku dostarczania części składowych produktów z podajników długość harmonogramu (określana jako czas zakończenia wykonywania ostatniej operacji) jest uzależniona m.in. od odpowiedniego rozmieszczenia tych urządzeń pomocniczych. W rozdziale 3 przedstawiono zarówno metody oparte na podejściu monolitycznym, jak i metody wielopoziomowe, czyli hierarchiczne. Zgodnie z założeniami metod hierarchicznych problem globalny został podzielony na kolejno rozwiązywane zadania, przypisane poszczególnym poziomom metody. Porównano dwie koncepcje metod hierarchicznych. Są to metody dwupoziomowe, w których rozwiązanie zadania przypisanego poziomowi górnemu stanowi dane wejściowe do zadania rozwiązywanego na poziomie niższym. W jednej z koncepcji metod hierarchicznych przydział operacji do maszyn ma miejsce na poziomie górnym, a zgodnie z drugą koncepcją rozdział obciążenia maszyn przez operacje wykonywane dla produktów dokonywany jest na poziomie dolnym. Zaprezentowane wyniki eksperymentów obliczeniowych, przeprowadzonych za pomocą opracowanych metod, służą nie tylko do porównania tych dwóch koncepcji, ale również do porównania rozwiązań wyznaczonych przy wykorzystaniu metod monolitycznych oraz hierarchicznych. Eksperymenty obliczeniowe służyły również do oceny jakości zbudowanych heurystyk relaksacyjnych. Rozdział 3 zawiera także przykłady zastosowania opisanych w nim metod.

W rozdziale 4 zaprezentowano metody planowania przepływów produktów przez łańcuchy dostaw o sieciowym charakterze. Niektóre z metod służą ponadto do selekcji dostawców (wybierani są dostawcy obsługujący poszczególnych odbiorców). Część z metod umożliwia podział transportowanych produktów na równocześnie przewożone partie. W opisanych metodach uwzględniono kryterium kosztowe – minimalizowana suma obejmuje następujące koszty: zakupu produktów, ich transportu, koszty magazynowania produktów dostarczonych zbyt wcześnie, a także kary za opóźnione dostarczenie produktów. W związku z koniecznością

uwzględnienia w opracowanych metodach znacznej liczby parametrów zaproponowano dokonanie wstępnej selekcji dostawców oraz firm transportowych. Metody przedstawione w rozdziale 4 oparte są na koncepcji monolitycznej lub hierarchicznej. W przypadku zastosowania koncepcji hierarchicznej selekcja dostawców poprzedza selekcję firm transportowych oraz środków transportu dokonywaną z równoczesną budową harmonogramu przepływów produktów. W celu rozwiązywania problemów o relatywnie znacznych rozmiarach zaproponowano heurystyki relaksacyjne. Zaprezentowane wyniki eksperymentów obliczeniowych służą m.in. do oceny tych heurystyk czy porównania rozwiązań wyznaczonych przy wykorzystaniu metod opartych na podejściu monolitycznym i hierarchicznym. Wyróżnić tu również należy zaproponowaną koncepcję oceny intratności przynależności do sieci poszczególnych zakładów produkcyjnych. W opracowanych metodach uwzględniane są bowiem interesy ogółu (wszystkich ogniw sieci i firm transportowych), a nie poszczególnych ogniw sieci, do których należą zakłady produkcyjne. Oceniona intratność przynależności do sieci może stanowić podstawę do negocjacji w rozdziale kosztów (pomiędzy zakładami produkcyjnymi – ogniwami łańcucha dostaw) związanych z funkcjonowaniem łańcucha dostaw. Rozdział zakończony jest przedstawieniem przykładów zastosowania wybranych metod.

W rozdziale 5 ujęto równocześnie problematykę dotyczącą poprzednich dwóch rozdziałów. Przedstawiono w nim wielopoziomową metodę przeznaczoną do planowania przepływów produktów przez linie produkcyjne zakładów wytwórczych, a także pomiędzy ogniwami łańcuchów dostaw, do których należą te zakłady. Każdy zakład produkcyjny traktowany jest jako odrębny moduł złożonego systemu. W przypadku każdej linii produkcyjnej takiego zakładu dobierana jest metoda planowania przepływów produktów uwzględniająca jego specyfikę (konfigurację linii produkcyjnej, organizację przepływów produktów, rodzaje marszrut produkcyjnych). Stosowane są tu metody opisane w rozdziale 3. Do planowania przepływów produktów pomiędzy ogniwami łańcucha dostaw wykorzystywany jest odrębny model matematyczny. Poszukiwany jest taki harmonogram przepływów produktów przez łańcuch dostaw, którego zastosowanie skutkuje ponoszeniem najmniejszych kosztów.

W ostatnim rozdziale zebrano najważniejsze wyniki oraz wnioski i przedstawiono kierunki dalszych badań.

Selected methods of planning product flows through production lines and supply chains

Summary

This monograph presents the methods developed by its author for the purposes of planning product flows through production lines as well as between the supply chain links – including between production plants. For the tasks associated with product flow planning, new mathematical models and new concepts of solving them were built. The outcome of the application of the methods presented are product flow schedules. Some of the methods developed are intended not only for the construction of product flow schedules, but also for the configuration of production lines (e.g. determining the number of machines for a production line or the layout of part feeders). The methods intended for the construction of schedules of flows through supply chains are characterised by the possibility of selecting suppliers as well as transportation companies that serve the individual links of the supply chain.

Mathematical programming is the operational research tool used in methods developed. The tasks of construction of schedules of product flow formulated in the form of linear mathematical models with integer variables. The monolithic or hierarchical approaches are used in solving problems related to the construction of schedules of product flow. In the methods based on the monolithic approach, all partial problems are solved at the same time. The hierarchical approach, on the other hand, consists in breaking down a global problem into tasks, which are solved one after another. The monograph compares both concepts of problem solving and describes their advantages and disadvantages.

Methods used to arrive at precise and approximate solutions, in terms of the criteria used, were presented. Some of the approximate methods are based on the hierarchical approach, in which linear mathematical models of integer programming tasks were built for its specific levels. On the other hand, a certain group of approximate methods is based on the single-level approach, which employs the relaxation technique. The monograph presents recommendations for the application of the appropriate concepts of methods.

The areas of interest mentioned above show that this monograph concerns **production engineering**. The problems of production planning and logistics system management discussed in the monograph are part of this scientific discipline. The scope of issues discussed in relation to the planning of product flows through network supply chains is also characteristics of **logistics**. The optimization methods used belong to the field of **operational research**.

The objective of the paper was the development and presentation of methods which allow solving practical problems with standard operational research tools. Various types of criteria (time, cost) were taken into account in the solved optimization problems. Multi-criteria methods

were also developed. Taking into consideration planned machine stoppages is a characteristic feature of the presented methods, thus the schedules of product flow allow time for events such as refitting, repairs, and maintenance.

The execution of the described objective of the paper is covered by the individual chapters. Chapter 1 presents the basic concepts related to building schedules of product flow, both through production lines as well as between the links of supply chains. The configurations of production lines taken into account in the developed methods are described. The types of production routes for which the schedules of product flow are built are also defined. The basic parameters of schedules of product flow are characterised and the criteria used in the construction of these schedules are interpreted. The description of the configuration of production lines in this chapter includes various types of machines, intermediate buffers, auxiliary devices (e.g. part feeders). A description of the basic parameters that define products, production machines, and inter-operational warehouses is also included. Assembly lines are specified as a separate type of production lines. The task of construction of schedules of simultaneous flow of various types of products was formulated for production systems.

Chapter 1 also deals with the issues related to the functioning of network supply chains. The task of construction of schedules of simultaneous flow of various types of products between two groups of links: suppliers and customers, was formulated. The basic parameters were listed, which describe suppliers, customers, products, transport companies and the relevant transportation modes. The issues of supplier selection and selection of transport companies is presented, which is taken into consideration in tactical decisions for supply chains of network nature. The factors which affect the selection of suppliers and selection of transport companies were specified. The criteria and constraints which are used in the construction of schedules of product flow through supply chains were characterised. Various types of flexibility were described, as regards the planning of both supply chains as well as their links: production plants to which production lines (among others) belong.

Chapter 2 describes the applied methods of planning product flow through production lines and through supply chains. A review of the literature related to product flow planning is presented. This review emphasises the methods based on the monolithic concept and the hierarchical methods. The literature that inspired the author of this monograph to develop new methods is highlighted. Characteristic features of these new methods are presented, which distinguish them from other concepts. The mathematical basis of the used methods is also presented, with reference to classic problems of optimization, which include the transport task or the allocation task. Linear mathematical models of these tasks constitute the departure point for the construction of new methods of product flow planning, which belong to the production engineering area. Relatively significant numbers of parameters, variables and constraints are taken into account in these new methods. Presentation of these methods is provided in the following chapters.

Chapter 3 is dedicated to describing the methods built for the planning of product flow through production lines. Time and cost criteria are taken into account in these methods. Methods built for production lines without parallel machines and methods built for multi-stage production lines are described here. Each stage includes a set of machines operated in parallel. Production lines with intermediate buffers are taken into account. Two cases are taken into

account in the developed methods if there are no such local warehouses in the production system configuration. The first of them gives the possibility of blocking the machines by the products awaiting the next operations. This means that machines may perform the role of buffers. In the second case, machines only perform process operations, and breaks between the operations executed for the given product are not allowed. It is the so-called “no-wait” scheduling. Scheduling is understood as separation of operations in space (allocation to machines) and time. Chapter 3 also presents methods of planning product flow through assembly lines. Separation of part feeders is an additional task solved for these production systems. If constituent parts for the products are delivered from feeders, the length of the schedule is dependent on the corresponding location of these auxiliary devices. Chapter 3 presents methods based on the monolithic approach as well as multilayer, or hierarchical, methods. Two concepts for hierarchical methods are compared: allocation of operations to machines in one of them is done on the upper level, whereas in the other concept, the loading of machines with operations executed for products is effected on the bottom level. The presented results of computational experiments conducted with the developed methods are used not only to compare these two concepts but also to compare the solutions arrived at with the use of the monolithic and hierarchical methods. The computational experiments were also used to assess the quality of the constructed relaxation heuristics. Chapter 3 also includes the presentation of sample applications of the described methods.

Chapter 4 presents methods of planning of product flows through network supply chains. These methods are also used to select suppliers and transportation modes. Some of the methods allow breaking down the transport order into batches of simultaneously transported products. The cost criterion is taken into account in the described methods, where the minimized sum of costs includes the costs of support for the supply chains, which include the costs of purchase of products, their transport, costs of storing products delivered early, as well as penalties for delays in the delivery of products. Due to the necessity of including a significant number of parameters in the developed methods, a preliminary selection of suppliers and transport companies is suggested. The methods presented in Chapter 4 are based on the monolithic or hierarchical concepts. With the hierarchical concept applied, the task of supplier selection precedes selection of transport companies and transportation modes, which is done along with the simultaneous construction of the product flow schedule. For problems of relatively large scale, relaxation heuristics are proposed. The presented results of computational experiments are used, among others, for the assessment of these heuristics or comparisons of solutions arrived at with the methods based on the monolithic and hierarchical approaches. The proposed concept of assessment of the profitability of network affiliation by particular production plants has to be emphasised here because the developed methods take into account the interests of the entire situation and not only those of the individual links to which the production plants belong. This chapter ends with the presentation of sample applications of selected methods.

Chapter 5 tackles the issues related to the two preceding chapters. It presents the multi-level method dedicated to planning product flow through production lines in manufacturing plants as well as between links of supply chains to which these plants belong. Each production facility is regarded as a separate module of a complex system. For each production line of such a plant, the method of planning of product flow is selected which takes into consideration

its specific nature (configuration of the production line, organization of product flow, types of production routes). The methods described in Chapter 3 are used here. A separate mathematical model is used to plan the product flow between the supply chain links. The objective is to develop a schedule of product flow through the supply chain for which the costs of functioning are as low as possible.

The last chapter gathers the most important results and conclusions and presents possible directions for further research.