

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 658.5:519.8

doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-55-64

ОСОБЕННОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Виктор Александрович Широченко^{1✉}, Никита Петрович Скрылев²,
Вадим Александрович Недюхин³

^{1, 2, 3} Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

¹ shirsvet@tut.by, <http://orcid.org/0009-0002-0198-5262>

² mniccita@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0004-4698-0558>

³ firevadick@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0003-0221-6139>

Аннотация. Цель исследования: обоснование структуры и параметров математической модели, предназначенной для решения задачи оптимизации загрузки оборудования промышленного предприятия с многономенклатурным серийным производством. Задача: разработка математической модели и реализующей ее программной системы для проведения исследований ее эффективности при решении задачи повышения эффективности промышленного производства. Методы исследования: математическое моделирование на основе методов линейного программирования. Новизна работы: рассмотрены вопросы обоснования параметров математической модели для оптимизации загрузки оборудования при высокой размерности задачи. Результаты исследования: разработаны математическая модель и программное обеспечение, позволяющее повысить эффективность функционирования промышленного предприятия. Выводы: результаты проведенных исследований будут полезными разработчикам программных систем, используемых для управления производством на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: производственный процесс, производственная мощность, методы линейного моделирования, многономенклатурное производство, управление производственными ресурсами, оптимизация загрузки оборудования

Для цитирования: Широченко В.А., Скрылев Н.П., Недюхин В.А. Особенности оптимизации промышленного производства на основе математического программирования // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №2 (28). С. 55-64. doi: 10.30987/2658-6436-2025-2-55-64.

Original article

Open Access Article

FEATURES OF INDUSTRIAL PRODUCTION OPTIMIZATION BASED ON MATHEMATICAL PROGRAMMING

Victor A. Shirochenko^{1✉}, Nikita P. Skrylev², Vadim A. Nedyukhin³

^{1, 2, 3} Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

¹ shirsvet@tut.by, <http://orcid.org/0009-0002-0198-5262>

² mniccita@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0004-4698-0558>

³ firevadick@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0003-0221-6139>

Abstract. The aim of the study is to substantiate the structure and parameters of a mathematical model intended for solving the task of optimizing loading the equipment at an industrial enterprise engaged in multivariety series production. The objective is to develop a mathematical model and a software implementation system to conduct studies assessing its effectiveness in addressing the challenge of enhancing industrial production efficiency. The paper uses a method of mathematical modelling based on linear programming methods. The novelty of the study addresses questions regarding the validation of parameters for a mathematical model optimized for equipment loading in tasks with high-dimensional complexity. The findings include developing a mathematical model and associated software, capable of boosting the operational efficiency of industrial enterprises. The conclusions are the results of this study will prove useful for developers of software systems employed in production management at industrial enterprises.

Keywords: production process, production capacity, linear modelling methods, multi-product production, production resource management, equipment loading optimization

Введение

Повышение эффективности производственных процессов является ключом к успеху для любой компании и является важным фактором для развития экономики и повышения уровня жизни. Одним из важнейших инструментов, позволяющих это обеспечить, являются информационные технологии, основанные на математическом моделировании производственных процессов. Аналитические инструменты позволяют создавать и использовать системы планирования и управления ресурсами, которые могут оптимизировать процессы и значительно повысить эффективность производства.

Первым шагом на пути повышения производительности производственных процессов является оптимизация загрузки оборудования, что позволяет в полной мере использовать его производственные мощности. С точки зрения математики такая задача может быть поставлена как достаточно простая задача линейного программирования, которая описана достаточно подробно в различных источниках [1, 2].

Однако примеры, рассмотренные в литературе, имеют небольшую размерность и простую структуру, а размерность реальных производственных систем, как правило, достигает нескольких сотен технологических операций и сотен единиц оборудования. При математической постановке задачи в этих условиях, будут определены сотни управляемых параметров и сотни ограничений. Ввиду большой размерности промышленных производств и специфики использования оборудования такая задача имеет множество особенностей, которые нуждаются в подробном рассмотрении.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Конструкция сложных технических изделий имеет иерархическую структуру с множеством подсистем, каждая из которых состоит из узлов или сборочных единиц, собираемых из отдельных деталей. В этом случае изделие состоит из нескольких сотен деталей. В свою очередь для изготовления каждой детали существует свой технологический процесс, состоящий из нескольких технологических операций, выполняемых последовательно на соответствующем оборудовании. Сборка деталей в узлы также осуществляется по некоторой технологии на специальных рабочих местах с соответствующим оборудованием.

С целью упрощения описания упомянутой выше математической модели производственного процесса рассмотрим постановку задачи на достаточно простом изделии, структура которого представлена на рис. 1. Приведенное изделие состоит только из двух сборочных единиц, каждая из которых имеет по две детали. Несмотря на такой простой пример с его помощью можно рассмотреть множество нюансов постановки и решения задачи оптимизации производственного процесса любого технического изделия.

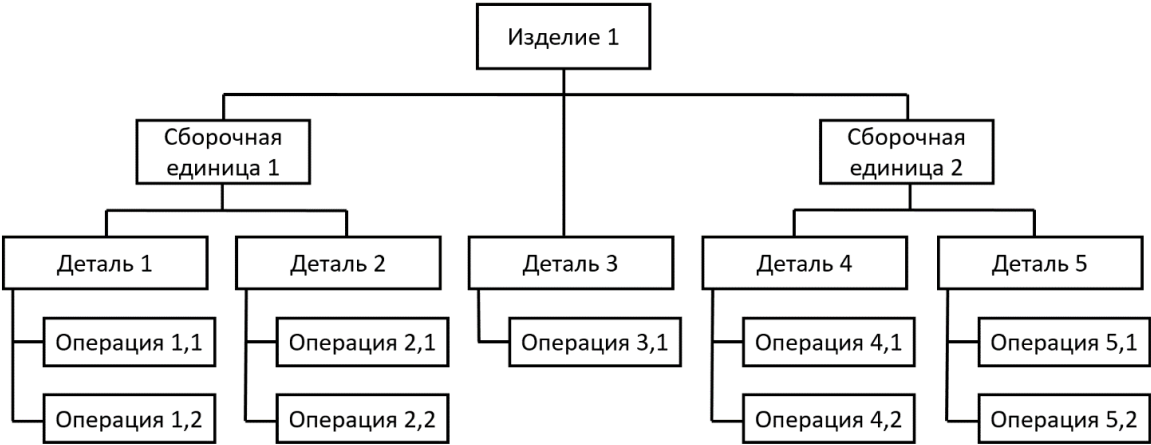


Рис. 1. Структура изделия
Fig. 1. Product structure

На рис. 2 приведен пример схемы технологического процесса производства этого изделия. На схеме видно, что каждая из деталей имеет свой технологический процесс, состоящий из одной или двух технологических операций. Каждая операция выполняется на соответствующем оборудовании и имеет свою длительность.

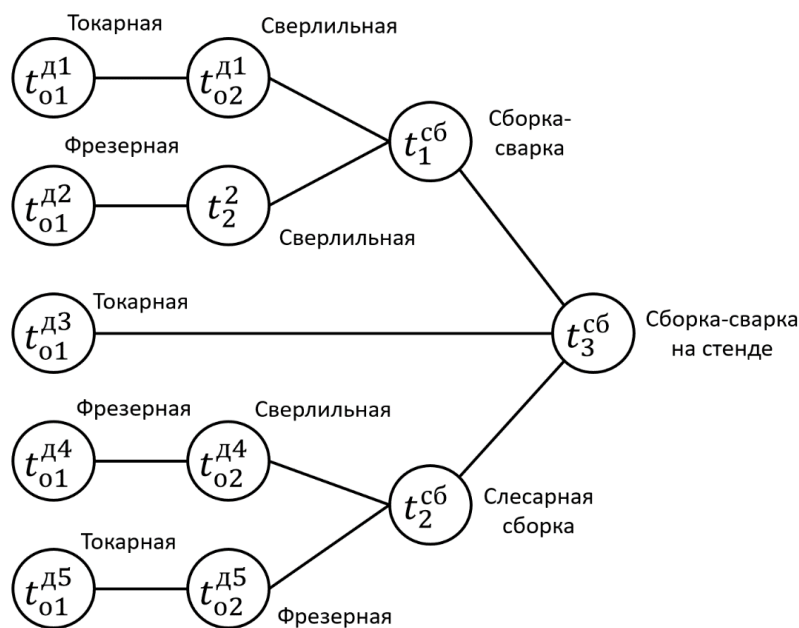


Рис. 2. Схема производственного процесса изготовления изделия
 Fig. 2. The scheme of the manufacturing process of the product

При массовом производстве станочный парк предприятия формируют под изготавливаемые изделия таким образом, что за каждой единицей оборудования закрепляется только одна операция, а количество оборудования подбирается с целью максимальной его загрузки. Эффективность производства в этом случае обеспечивается при его проектировании и поддерживается организационными мероприятиями, проводимыми на предприятии.

В случае серийного или крупносерийного многопродуктового производства в разные временные периоды изменяется номенклатура его продукции и объемы ее выпуска. В этом случае загрузка оборудования все время меняется, а следовательно, остро встает вопрос об ее оптимизации для наиболее эффективного использования имеющихся производственных мощностей [3].

В связи с этим рассмотрим решение задачи закрепления за имеющимся оборудованием выполнения необходимых технологических операций на примере изделия, представленного в вышеприведенном примере. Предположим, что предприятие располагает необходимым оборудованием для выполнения только требуемых технологических операций и задача оптимизации ставится в рамках имеющегося станочного парка.

В случае реального производства станочный парк будет иметь значительно большую номенклатуру. Задача оптимизации загрузки большого парка оборудования будет иметь многократно большую размерность, но в плане ее постановки различий не будет.

Далее будем считать, что однотипные операции могут выполняться на любом из станков данного типа и даже выполняться на нескольких из них одновременно. Например, некоторая токарная операция при наличии нескольких токарных станков может выполняться на любом из них или частично на одном и частично на другом. Поэтому при описании технологических цепочек изготовления различных деталей будем расписывать альтернативные варианты закрепления операций за оборудованием.

Возможный вариант описания указанных технологических операций, представленных на рис. 2 приведен в табл. 1. В каждой строке таблицы указан номер операции, название операции, конкретный станок, на котором она может быть выполнена и время ее выполнения.

Номер операций показывает их последовательность в процессе производства и как принято в технологических документах возрастает с шагом 5. Это сделано для того чтобы при внесении изменений в технологические процессы при добавлении операций не изменять полностью всю документацию, а только ее дополнять. Например, при необходимости добавить операцию в самое начало процесса ее номер может быть 003, а если надо добавить после первой операции, то номер будет 007.

Таблица 1

Описание параметров производственных операций

Table 1

Description of production operation parameters

Номер операции	Операция	Оборудование	Количество оборудования	Время операции, мин
Деталь 1				
005	Токарная	Токарный станок 1	1	5
005	Токарная	Токарный станок 2	1	5
010	Сверлильная	Сверлильный станок 1	1	3
010	Сверлильная	Сверлильный станок 2	1	3
Деталь 2				
005	Фрезерная	Фрезерный станок 1	1	6
005	Фрезерная	Фрезерный станок 2	1	6
010	Сверлильная	Сверлильный станок 1	1	2
010	Сверлильная	Сверлильный станок 2	1	2
Деталь 3				
005	Токарная	Токарный станок 1	1	5
005	Токарная	Токарный станок 2	1	5
Деталь 4				
005	Фрезерная	Фрезерный станок 1	1	7
005	Фрезерная	Фрезерный станок 1	1	7
010	Сверлильная	Сверлильный станок 1	1	4
010	Сверлильная	Сверлильный станок 1	1	4
Деталь 5				
005	Токарная	Токарный станок 1	1	4
005	Токарная	Токарный станок 2	1	4
010	Фрезерная	Фрезерный станок 1	1	6
010	Фрезерная	Фрезерный станок 2	1	6
Сборочная единица 1				
005	Сборка-сварка	Сварочный полуавтомат	1	7
Сборочная единица 2				
005	Слесарная сборка	Слесарное место	1	10
Изделие: сборочная единица 3				
005	Сборка-сварка	Кантователь	1	15
		Сварочный полуавтомат	1	

Повторяющийся в таблице номер технологической операции показывает возможные альтернативы закрепления операций за различными единицами оборудования. Длительность выполнения одной и той же операции на различных станках, в связи с различием их параметров, может отличаться, но для рассматриваемых в данной работе вопросов это не имеет существенного значения.

При решении задачи оптимизации загрузки оборудования могут рассматриваться следующие подходы. В первом подходе может рассматриваться задача максимизации загрузки оборудования при необходимости произвести заданный объем продукции за определенный период времени. При этом мы можем столкнуться с проблемой нехватки фонда рабочего времени оборудования для производства.

Во втором подходе может ставиться задача определения максимально возможного объема производства продукции в заданный период. Объем продукции может определяться либо в натуральных единицах, либо в стоимостном выражении.

В третьем подходе при невозможности произвести требуемый объем продукции в заданный период собственными силами необходимо определить минимальный объем производства деталей для передачи другим производителям, например, в рамках кооперации.

Рассмотрим, как ставится задача оптимизации и все ее особенности в рамках первого подхода на производстве изделий, конструкция и технология которого описаны ранее. Зададимся объемом производства в 30 шт., периодом в одну смену, продолжительностью в 480 мин. и штучным временем выполнения соответствующих операций, приведенным в табл. 1.

Первым шагом к решению задачи необходимо оценить возможность получения положительного результата. Для этого представим исходные данные в таблице как это показано на рис. 3.

Исходные технологические параметры тштучное												
Элемент	Кол-во в сборке	Кол-во на изделие	Операция	Фрезерный		Сверлильный		Токарный		Сварка	Слесарный	Стенд
				Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	
Сб3	1	30	Сб3									15
Сб2	1	30	Сб2								10	
Сб1	2	60	Сб1							7		
Дет 1	2	120	Оп1д1					5	5			
		120	Оп2д1			3	3					
Дет 2	1	60	Оп1д2	6	6							
		60	Оп2д2			2	2					
Дет 3	2	60	Оп1д3					5	5			
Дет 4	1	30	Оп1д4	7	7							
		30	Оп2д4			4	4					
Дет 5	1	30	Оп1д5					4	4			
		30	Оп2д5	6	6							
				750		600		1020		420	300	450

Рис. 3. Матрица исходных данных
Fig. 3. The matrix of the initial data

На рисунке прямоугольная область, выделенная жирной линией, представляет собой матрицу $t_{шт}$ – длительность операций, выполняемых на соответствующем оборудовании. Каждая строка матрицы соответствует некоторой технологической операции, а столбец используемому оборудованию. Слева от матрицы представлены данные по структуре изделия и количеству выполнения соответствующих операций. Используя данную таблицу, путем простейших математических операций, можно легко вычислить величину необходимого фонда времени соответствующего оборудования, необходимого для изготовления изделия в заданном объеме. Вычисленная величина необходимого фонда времени представлена под матрицей в соответствующих столбцах по видам оборудования.

Так как рассматривается одна смена в 480 мин., а фрезерных и сверлильных станков по два, то их фондов времени вполне достаточно для производства. А вот для токарной операции фонда времени не хватает, поэтому получить решение поставленной задачи линейного программирования с такими исходными данными невозможно. Для обеспечения возможности решения задачи представим, что один из токарных станков работает сверхурочно половину второй смены.

В данной постановке задачи управляемыми параметрами являются количества выполняемых операций, закрепленных за соответствующим оборудованием. В качестве ограничений приняты фонды времени по оборудованию и количество операций, которые должны быть выполнены в соответствии с планом производства (рис. 4). Кроме этого, на управляемые параметры должны быть наложены условия целочисленности.

В качестве целевой функции можно взять разницу между суммарным значением существующего фонда времени по оборудованию и суммарным значением времени занятости оборудования в производственном процессе. Данную величину необходимо максимизировать. Таким образом мы получаем аддитивную целевую функцию.

	Фрезерный		Сверлильный		Токарный		Сварка	Слесарный	Стенд	
	Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1	
С63									450	
С62								300		
С61							420			
Оп1д1					480	120				
Оп2д1			360	0						
Оп1д2	360	0								
Оп2д2			120	0						
Оп1д3					0	300				
Оп1д4	0	210								
Оп2д4			0	120						
Оп1д5					0	120				
Оп2д5	0	180								
Затраты времени по оборудованию	360	390	480	120	480	540	420	300	450	Σ 3540
	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	-
Фонд времени по оборудованию	480	480	480	480	480	720	480	480	480	Σ 4560
Значение целевой функции										= 1020

Рис. 4. Трудоемкость операций по оборудованию с учетом их количества
Fig. 4. The complexity of equipment operations, taking into account their number

Математически такая постановка задачи может быть записана следующим образом.

$$\sum_{j=1}^m t_{ij} x_{ij} \leq \Phi_j \quad \text{при } i = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = N_{\text{изд}} n_k \quad \text{при } i = \overline{1, n}; \quad (2)$$

$$x_{ij} - \text{целые}; \quad (3)$$

$$F = \sum_{j=1}^m \Phi_j - \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \max, \quad (4)$$

или

$$F(x_{ij}) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где n – количество технологических операций; m – количество единиц оборудования; t_{ij} – длительность i -ой операции, выполняемой на j -м оборудовании; Φ_j – фонд времени j -го оборудования; $N_{\text{изд}}$ – количество произведенных изделий; x_{ij} – количество выполняемых i -х операций, закрепленных за j -м оборудованием; $F(x_{ij})$ – аддитивная целевая функция.

Главным недостатком применения аддитивной целевой функции является бесконтрольное влияние каждого из слагаемых на целевую функцию, т.е. улучшение значения целевой функции может происходить при ухудшении одного или нескольких ее слагаемых [4]. В связи с этим при возможности или необходимости закрепить одну операцию за несколькими станками мы никак не можем в ходе поиска оптимального решения управлять соотношением этой загрузки. Может получиться так, что один из альтернативных станков выберет свой фонд времени полностью, тогда как второй будет загружен только частично.

Результаты

В качества решения мы получим матрицу значений управляемых параметров, представленных на рис. 5. Полученная матрица решений является весьма разреженной и чем больше размерность производственного процесса, тем больше ее разреженность. Такой вид матрицы решений затрудняет построение вычислительно процесса, поэтому все управляемые параметры можно свести в отдельный вектор, каждый элемент которого будет соответствовать некоторому элементу матрицы.

Из полученного решения видно, что все операции в полном объеме закреплены за единственным оборудованием, и только токарная операция при изготовлении детали 1 выполняется частично на первом токарном станке и частично на втором.

		Количество выполняемых операций, закрепленных за оборудованием (управляемые параметры)								
		Фрезерный			Сверлильный		Токарный		Сварка	Слесарный Стенд
		Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1
С63	С63									30
С62	С62								30	
С61	С61							60		
Дет 1	Оп1д1					96	24			
	Оп2д1			120	0					
Дет 2	Оп1д2	60	0							
	Оп2д2			60	0					
Дет 3	Оп1д3					0	60			
	Оп1д4	0	30							
Дет 4	Оп2д4			0	30					
	Оп1д5					0	30			
Дет 5	Оп2д5	0	30							

Рис. 5. Решение задачи оптимизации
Fig. 5. Solving the optimization problem

Соответствующая этому решению загрузка оборудования видна на рис. 4 в табличном виде и на рис. 6 в графическом виде с размерностью, измеряемой временем. Если поделить эти значения на длительность периода, т.е. смены, то получим величину загрузки оборудования в относительном значении или в процентах. Такие значения при анализе воспринимаются значительно понятней. Так средняя загрузка оборудования по всему производству равна 78 %, что является довольно высокой загрузкой.

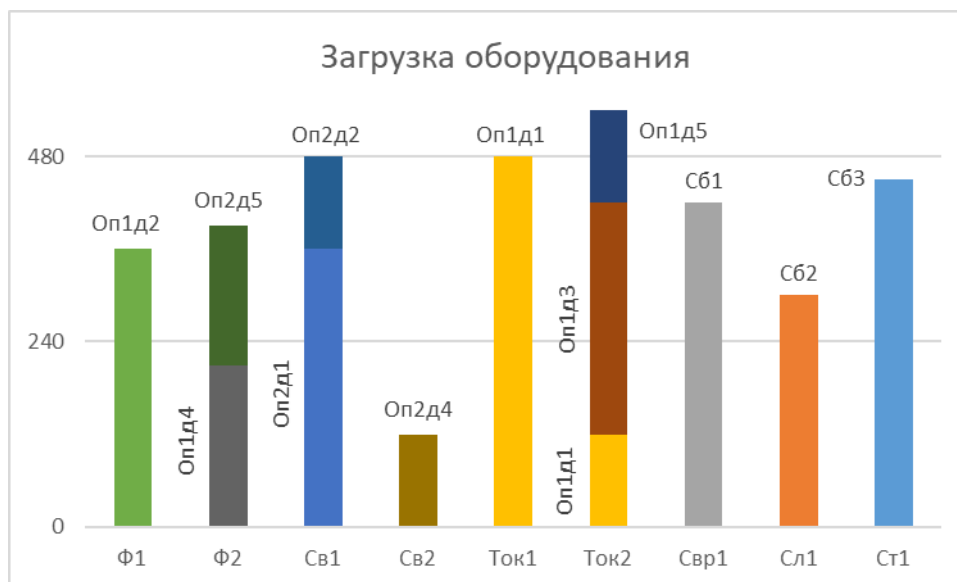


Рис. 6. Графическая иллюстрация загрузки оборудования
Fig. 6. Graphical illustration of equipment loading

Если будет использована целевая функция (5), в которой минимизируется суммарное время на производство заданного объема изделий, то существующие фонды времени можно не учитывать в модели. Однако в этом случае можно ожидать, что полученный «минимальный» период будет определен исходя из полной загрузки одного из альтернативных станков. Такой выбор результата скорее будет соответствовать максимальному периоду, в который можно уместить производственный процесс.

На рис. 7 представлены результаты решения задачи без учета ограничений по фондам времени. Из них видно, что все фрезерные операции закреплены за одним фрезерным станком несмотря на наличие второго станка. То же самое произошло и со сверлильными и токарными станками. В результате «минимальный» период стал больше, чем в примере на рис. 4.

Кол. Изд.			25	Фрезерный Сверлильный Токарный Сварка Слесарный Стенд									
Кол эл				Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1	
С63	1	25	С63									375	
С62	1	25	С62								250		
С61	2	50	С61							350			
Дет 1	2	100	Оп1д1					0	500				
		100	Оп2д1			0	300						
Дет 2	1	50	Оп1д2	0	300								
		50	Оп2д2			100	0						
Дет 3	2	50	Оп1д3					0	250				
Дет 4	1	25	Оп1д4	0	175								
		25	Оп2д4			0	100						
Дет 5	1	25	Оп1д5					0	100				
		25	Оп2д5	0	150								
Затраты времени по оборудованию				0	625	100	400	0	850	350	250	375	Σ 2950

Рис. 7. Трудоемкость операций по оборудованию с учетом их количества без учета ограничений по фонду времени
Fig. 7. The complexity of equipment operations, taking into account their number, without taking into account time constraints

Для того чтобы действительно получить значение минимального периода целесообразно использовать такую целевую функцию, которая позволила бы равномерно распределить загрузку оборудования. Для этого можно свести разность между максимальным и минимальным временем загрузки оборудования к минимуму. В этом случае целевая функция может быть записана в виде:

$$F(x_{ij}) = \left(\max_{1 \leq j \leq m} \left(\sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \right) - \min_{1 \leq j \leq m} \left(\sum_{i=1}^n t_{ij} x_{ij} \right) \right)^2, \quad (6)$$

и задача становится нелинейной.

Результаты решения задачи с такой целевой функцией представлены на рис. 8. Стоит отметить, что на решение даже такой маломерной задачи (в ней всего только два десятка управляемых параметров и примерно столько же ограничений) потребовалось несколько секунд, что значительно больше чем время решения линейной задачи.

Из рис. 8 видно, что все станки загружены примерно одинаково. Это позволяет максимально уменьшить затраты времени на узком месте. Узким местом по-прежнему являются токарные станки, но значение времени операций на одно изделие равно 425 вместо 850 как это было показано на рис. 7. Однако при этом на токарном станке Ток1 три переналадки, а на станке Ток2 – две. На выполнение этих переналадок будет затрачено дополнительное время, которое в данном расчете никак не учитывается. Существуют переналадки и на другом оборудовании, что может оказать значительно меньшее влияние на длительность всего производственного процесса.

Выводы по исследованию

Из результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Получить удовлетворительное решение, обеспечивающее получение максимальной загрузки оборудования и, следовательно, минимального периода производства при заданном его объеме, с помощью методов линейного программирования – невозможно.
2. Применение нелинейных методов дает положительный результат, однако менее предпочтительно, т.к. для данной задачи в полной размерности требует существенных затрат времени.

Кол. Изд.			25	Фрезерный Сверлильный Токарный Сварка Слесарный Стенд									
Кол эл				Ф1	Ф2	Св1	Св2	Ток1	Ток2	Свр1	Сл1	Ст1	
С63	1	25	С63									375	
С62	1	25	С62								250		
С61	2	50	С61							350			
Дет 1	2	100	Оп1д1					180	320				
		100	Оп2д1			51	249						
Дет 2	1	50	Оп1д2	138	162								
		50	Оп2д2			98	2						
Дет 3	2	50	Оп1д3					145	105				
Дет 4	1	25	Оп1д4	0	175								
		25	Оп2д4			100	0						
Дет 5	1	25	Оп1д5					100	0				
		25	Оп2д5	126	24								
Затраты времени по оборудованию				264	361	249	251	425	425	350	250	375	Σ 2950
				<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	<=	
Фонд времени по оборудованию				480	480	480	480	480	720	480	480	480	Σ 4560
Значение целевой функции				Max= 425 Min= 249		(Max-Min)^2 =						30976	

Рис. 8. Использование квадратичной целевой функции

Fig. 8. Using a quadratic objective function

3. Минимальное значение длительности производственного процесса однозначно определяется степенью равномерности загрузки той части оборудования, которое является узким местом для производства.

4. Для надежного и быстрого решения задачи следует разбить ее на ряд подзадач, каждая из которых будет описывать однотипное оборудование, на котором возможно альтернативное выполнение операций.

5. Подзадачу с тем оборудованием, которое будет максимально загружено, а значит являться узким местом производства целесообразно решать на основе квадратичной целевой функции.

6. Остальные подзадачи должны обеспечить минимум переналадок соответствующего оборудования и поэтому их можно решать, как задачи линейного программирования с ограничениями по фонду времени, равными длительности операций в так называемом узком месте. Такой подход позволит сократить время на максимально загруженных операциях и минимизировать количество переналадок на другом оборудовании.

7. В ситуации возможного решения постановка такой задачи имеет смысл только в том случае, если альтернативное оборудование имеет различную производительность. В такой ситуации, если ищется минимум коэффициента загрузки (т.е. состояние, когда оборудование будет менее загружено), то в первую очередь будет загружаться более производительное оборудование, а затем менее производительное. Последнее может оказаться менее загруженным. При поиске максимума коэффициента загрузки наоборот: в первую очередь будет загружаться менее производительное оборудование. Таким образом, в первом случае будет максимально загружено более производительное оборудование, а во втором – менее производительное. В ситуации, если альтернативное оборудование имеет равную производительность, то решения задачи на максимум и на минимум дадут абсолютно одинаковый результат коэффициента загрузки.

8. Как при разной производительности альтернативного оборудования, так и при равной будет находиться множество одинаковых результатов, т.е. задача в данной постановке является много экстремальной, причем экстремумы равны между собой. Различие между полученными решениями будут только в разном сочетании закрепленных операций за оборудованием. При этом при наличии разнопроизводительного оборудования таких одинаковых решений будет меньше, а при равнопроизводительном оборудовании их будет значительно больше.

9. Поиск всех возможных равноценных решений задачи очень затратен и может потребовать часы работы программы. В связи с этим такой поиск нецелесообразен. Предпочти-

тельным закреплением операций может быть такое сочетание, при котором будет требоваться меньше переналадок оборудования. Такое требование можно включить в ограничения задачи оптимизации. Все остальные альтернативные решения могут быть абсолютно равноценными и, в связи с этим можно ограничиться поиском только одного из них.

Заключение

Проведенные исследования позволили глубоко изучить возможности постановки и решения задачи повышения эффективности производства на основе использования методов оптимизации загрузки оборудования. Полученные результаты позволили выполнить разработку программной системы, в которой реализованы описанные выше положения. Программная система имеет клиент-серверную архитектуру и выполнена на алгоритмическом языке C#. Оптимизационные процедуры построены на основе общедоступной библиотеки *Google OR Tools*, которое является программным обеспечением с открытым исходным кодом и предназначено для решения различных задач линейного программирования с ограничениями, в том числе и с условиями целочисленности.

Созданная программная система в настоящий момент успешно проходит этап испытаний, после которого будет передана для использования на промышленное предприятие с много номенклатурным серийным производством.

Список источников:

1. Новиков А.И. Исследование операций в экономике: Учебник для бакалавров. – 2-е изд. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2020. – 352 с.
2. Исследование операций и методы оптимизации. Часть 1. Лекционный курс. Составитель А.А. Мицель. ТОМСК: Изд. ТУСУР, 2019 – 167 с.
3. Касперович, С.А., Коновальчик Г.О. Организация производства и управление предприятием: учеб. пособие для студентов технических специальностей. – Минск: БГТУ, 2012. – 344 с.
4. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.: Дизайн ПРО, 2004. – 640 с.

Информация об авторах:

Широченко Виктор Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления» БРУ.

Скрылев Никита Петрович

старший преподаватель кафедры «Автоматизированные системы управления» БРУ.

Недьюхин Вадим Александрович

магистрант специальности «Системный анализ, управление и обработка информации» БРУ.

References:

1. Novikov A.I. Operations Research in Economics. 2nd ed. Moscow: Dashkov & Co; 2020.
2. Mitshel AA, compiler. Operations Research and Optimization Methods. Lecture Course. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; 2019. Part 1.
3. Kasperovich S.A., Konovalchik G.O. Organization of Production and Enterprise Management. Minsk: Belarusian State Technological University; 2012.
4. Tarasik V.P. Mathematical Modelling of Technical Systems. Minsk: Design PRO; 2004.

Information about the authors:

Shirochenko Victor Aleksandrovich Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automated Control Systems of Belarusian-Russian University.

Skrylev Nikita Petrovich

Senior Lecturer at the Department of Automated Control Systems of Belarusian-Russian University.

Nedyukhin Vadim Aleksandrovich Master's student in System Analysis, Management and Information Processing Specialty of Belarusian-Russian University.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.01.2025; одобрена после рецензирования 28.03.2025; принята к публикации 19.05.2025.

The article was submitted 27.01.2025; approved after reviewing 28.03.2025; accepted for publication 19.05.2025.

Рецензент – Медведев Д.М., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Medvedev D.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.