УДК 355.01:004.056

А.А. Перцев, А.Н. Подобрий, Ю.А. Радионова

РЕАЛИЗАЦИЯ РАВНОМЕРНОЙ ЗАГРУЗКИ ПРОИЗВОДСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Перцев Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, окончил механико-математический факультет Ульяновского государственного университета. Начальник отдела ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области внедрения автоматизированной системы управления предприятием. [e-mail: mars@mv.ru].

Подобрий Александр Николаевич, кандидат технических наук, окончил механико-математический факультет УлГУ. Заместитель начальника отдела ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет статьи в области внедрения автоматизированной системы управления предприятием. [e-mail: mars@mv.ru].

Радионова Юлия Александровна, кандидат технических наук, окончила механико-математический факультет УлГУ. Ведущий инженер-программист ФНПЦ АО «НПО «Марс». Имеет публикации в сфере автоматизированных систем документооборота, интеллектуальной организации хранения технической документации, статистической оценки поставщиков. Сфера научных интересов: электронный документооборот, архивохранилища, статистический анализ данных, системы поддержки принятия решений. [e-mail: julia-owl@mail.ru].

Аннотация

В статье представлен подход к расчету загрузки оборудования и работников или рабочих центров в процессе формирования плана производства в проектной организации, выпускающей машиностроительное оборудование, на основании длительности выполнения технологических операций и электронной структуры изделия, для обеспечения максимально равномерной загрузки производства с минимальной продолжительностью процесса изготовления.

Описана модель изготовления изделия и представлена методика формирования плана по рабочим центрам (РЦ) с набором ограничений, используемых при расчетах. Проводится расчет эффективности загрузки оборудования и длительности изготовления изделия на основании существующего плана изготовления изделий производством. Программная реализация расчета загрузки РЦ плана представлена в виде дополнительного модуля для интерактивного веб-ресурса и использует T-SQL для реализации.

Ключевые слова: формирование плана производства, критический путь, сетевой график, мелкосерийное производство, проектное производство, машиностроение, мощность производства, статистика выполнения операций, посменно-суточное планирование.

doi: 10.35752/1991-2927-2020-4-62-49-60

THE BALANCED PRODUCTION LOAD OF A MACHINE-ENGINEERING ORGANIZATION

Andrei Alekseevich Pertsev, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Ulyanovsk State University; Head of department at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of the automated enterprise management system implementation. e-mail: mars@mv.ru.

Aleksandr Nikolaevich Podobrii, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Ulyanovsk State University; Deputy Chief of department at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of the automated enterprise management system implementation. e-mail: mars@mv.ru.

Iuliia Aleksandrovna Radionova, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from the Faculty of Mechanics and Mathematics of Ulyanovsk State University; Lead Programming Engineer at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; an author of articles in the field of automated workflow systems, intelligent technical documentation storage bases and systems for statistical analysis of supplier appraisal; research interests are in the field of

electronic document management, archival depositories, statistical data analysis, decision support systems.
e-mail: julia-owl@mail.ru.

Abstract

The article deals with an approach to calculation of equipment, employee or work centers load during the production plan forming by machine engineering organizations. The calculations are based on the duration of manufacturing operations and the electronic structure of items, and provide the most balanced workload at the shortest time of production.

The article describes the model of item production and the technique of production plan forming according to each work center with the set of calculation constraints. It also calculates the efficiency of an equipment load and time of production based on the current production plan.

The calculation of load plan for work centers is provided by auxiliary software module of an interactive web-resource using the T-SQL.

Keywords: forming of production plan, critical path, network diagram, small-lot production, design production, machine manufacturing, capacity, statistics of operations flow, shiftwork scheduling.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач проектной организации, выпускающей машиностроительное оборудование, является удовлетворение потребности заказчиков согласно заключенным договорам, то есть выпуск продукции соответствующего качества в определенные сроки и с определенным бюджетом. Для обеспечения процесса производства зачастую используются различные наборы планов: от стратегического до детализирующего плана участка производственного подразделения [1].

Определение длительности изготовления или количества времени, которое необходимо потратить на выпуск продукции производственным предприятием, позволяет проводить анализ загрузки производства и формировать план выпуска продукции. Малые затраты времени на выпуск продукции, при ее высоком качестве, являются показателем совершенства технологии и организации производства. Также с затратами времени непосредственно связаны такие понятия, как: производительность труда, затраты труда, техническое нормирование труда и нормирование затрат рабочего времени.

Оперативно-производственное планирование на участке представляет собой завершающий этап внутрипроизводственного планирования. Оно напрямую связано с технико-экономическим планированием, являясь его продолжением, осуществляемым в ходе выполнения плана. Формирование оперативных планов в разрезе рабочих центров (РЦ) позволяет обеспечить своевременное и качественное выполнение производственного плана.

Реализация оперативного планирования достигается высоким уровнем автоматизации не только производственного блока, но и предприятия в целом, а также высоким качеством вводимой информации, что не всегда достигается в реальных условиях производства. Задача формирования реальной картины загрузки производства становится одной из важных задач автоматизации.

В практической деятельности действующего предприятия одной из сложностей является организовать

максимально равномерную загрузку производства с минимальной продолжительностью процесса изготовления. После выделения РЦ и формирования оперативного плана производства возможно провести расчеты для переопределения порядка изготовления деталей на конкретном производственном участке с учетом иного набора параметров или свойств, чем при проведении расчетов предыдущих этапов. В работе [1] показан механизм формирования плана производственных участков.

1 Модель изделия

Методология, применяемая в основе большинства корпоративных информационных систем, начала развиваться в 60-х годах XX века из планирования запасов Material Resource Planning.

Любое изделие состоит из сборочных единиц и деталей. Детали могут быть изготовлены на производстве из комплектующих изделий и материалов. Таким образом, изделие представимо в виде структуры – совокупности составных частей и связей между ними, определяющих входимость составных частей. Входимость – понятие, характеризующее использование элементов изделия в составе конечного изделия или его сборочных частей. Применимость – характеристика связи, показывающая, при каких условиях данная составная часть использована в конечном изделии или другой составной части [2].

Для изделия характерно, что сборочная единица состоит из нескольких элементов (сборочных единиц или деталей), то есть для нее применимо отношение «одно ко многим», поэтому структура изделия представима в виде дерева. Вершиной дерева является само изделие; в узлах дерева находятся сборочные единицы; детали, которые могут быть изготовлены или приобретены, представлены листьями. Дугами (ребрами) являются действия или трудовые процессы, сопровождающиеся затратами ресурсов, времени и приводящие к определенным результатам при переходе одной вершины в другую. В теории графов под дугой (ребром) понимается соединение двух вершин. Переход из одной верши-

ны в другую также сопровождается затратами ресурсов, среди которых особенно выделяется время. Использование времени в качестве базы для расчета стоимости перехода из вершины в вершину позволяет определить длительность изготовления изделия, очередность изготовления сборочных единиц и узлов, а также оценить стоимость изготовления. Таким образом, для целей построения плана производства в качестве длины дуги (ребра) дерева целесообразно использовать длительность изготовления сборочной единицы.

Разным типам производства присущи свои особенности. Типы производства – классификационная категория производства, выделяемая по признакам широты номенклатуры продукции, регулярности, стабильности и объема выпуска. Различают такие типы производства, как единичное, мелкосерийное, серийное, крупносерийное и массовое. Одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций. Коэффициент закрепления операций – отношение числа различных технологических операций, выполняемых или подлежащих выполнению в течение месяца, к числу рабочих мест [3]. Основная продукция проектной организации относится к мелкосерийному и единичному производству. При мелкосерийном производстве коэффициент закрепления операций лежит в диапазоне от 20 до 40, а при единичном производстве он не регламентируется [4].

В случае многономенклатурного мелкосерийного и единичного производства определённые сложности вызывает переход от объемно-календарного плана к оперативному плану на РЦ. Целью оперативного планирования является группирование заказов для обеспечения наилучшего сочетания сроков изготовления с равномерной загрузкой основных РЦ [5]. Наиболее удобной формой представления календарного плана для многономенклатурного мелкосерийного и единичного производства является сетевой график.

Задачи составления расписаний РЦ – сетевых графиков, с математической точки зрения, относятся к классу

NP-сложных комбинаторных задач. При формировании планов необходимо помнить, что в различных, с точки зрения серийности, производствах, планово-учетные единицы (ПУЕ) могут быть представлены с различной степенью детализации. Существует определенная связь ПУЕ с типом производства и принятой на предприятии системой формирования планов (табл. 1). Учет этого фактора позволяет в ряде случаев привести задачу планирования для единичного и мелкосерийного производства к более легким задачам планирования серийного производства [6].

В работах [7–9] даны различные подходы к моделированию структуры и событий изготовления изделия в связи с системой планирования и типами производства. Для целей формирования модели событий изготовления изделий будем использовать результаты, полученные в [10, 11].

Модель событий изготовления изделия $\{I\} : I_i$ можно представить в виде дерева, корнем которого является готовое изделие, вершинами – наборы результатов работ I_p , ветвями – технические средства (ТС) $\{T\} : T_p$, состоящие из комплекта сборок – деталей E_j . Без потери общности в подходах будем рассматривать только процессы изготовления изделия, так как предлагаемая модель может являться составной частью сетевого графика изготовления сложного изделия, состоящего из аппаратной и программной частей.

ТС включает в себя следующие атрибуты:

$$T_i^j = \{D_i, E_i\}^j, \quad (1)$$

где D_i – дата изготовления,

E_i – сборка (деталь).

Сборка ТС E_i^j конкретного узла включает в себя набор техпроцессов TP_i^j всех входящих в нее подборок, технологических операций P_m^j , уровень вложенности V_p^j , расстояние до вершины дерева RV_p^j и родителя RR_p^j .

Таблица 1

Связь систем объемно-календарного планирования и ПУЕ с типом производства

Принятая система планирования	ПУЕ	Тип производства				
		массов.	кр.сер.	серийн.	мл.сер.	единич.
по такту потока	деталь	*				
нормативные сроки	партия деталей, сборочных единиц	*	*			
складская	партия деталей, сборочных единиц	*	*	*		
машинокомплектная	машинокомплект		*	*		
компл.-групповая	циклового комплект			*	*	
компл.-узловая	комплект на узел				*	
позаказная	заказ на изделие				*	*

$$E_t^j = \{TP_t, P_m, V_p, RV_p, RR_p\}^j. \quad (2)$$

P_m^j состоит из названия операции, разряда и трудоемкости изготовления N_k .

Разряд операции определяет сложность выполнения однотипных операций.

Представленное описание ТС (1)–(2) позволяет формировать его первоначальное состояние. Для обеспечения полноценного жизненного цикла изделия или ТС необходимо обеспечить контроль текущего состояния процесса изготовления изделия или ТС. Для решения данной задачи целесообразно использовать дефицитную ведомость DV_t^j – список необходимых для изготовления сборок и деталей, формируемый на основании документов запуска на изготовление. Одним из результатов процесса запуска изделия (ТС) в производство является сопроводительный ярлык S_t^j , обеспечивающий контроль хода изготовления детали (сборочной единицы) на протяжении всего жизненного цикла.

$$DV_t^j = \{S_t, E_t\}^j. \quad (3)$$

Для расчета мощности изготовления целесообразно использовать статистику закрытых операций P_j в определенный период времени на основании закрытых сопроводительных ярлыков S_t^j , а именно длительность изготовления каждой операции DP_m^j с определенной трудоемкостью N_k .

Технически обоснованной нормой времени выработки, обслуживания и численности считается такая, которая в условиях данного предприятия рассчитана на наиболее эффективное использование оборудования и времени, а также наиболее рациональную технологию работ, организацию и обслуживание рабочих мест, применение передовых методов труда при обязательном соблюдении требований физиологии, обеспечивающих сохранение здоровья и работоспособности сотрудников.

Виды временных затрат на изготовление представлены и детализированы авторами в статье [2], среди которых выделяют:

- подготовительно-заключительное время;
- основное (технологическое) время;
- вспомогательное время;
- время обслуживания рабочего места.

Длительность изготовления сборки E_t^j можно сформулировать следующим образом:

$$DE_m^j = P_m^j * \sum \frac{DP_m^j}{\sum N_k}. \quad (4)$$

Кроме длительности изготовления, необходимо внимательно анализировать резерв времени события. Резерв времени события – это такой промежуток времени, на который может быть отсрочено свершение этого события без нарушения сроков завершения разработки в целом [8, 11]. Для расчета запаса по времени

необходимо определить длительность изготовления элемента на критическом пути DK_t^j .

$$DK_t^j = \max(DE_m^j, E_t^j, V_p^j). \quad (5)$$

Используя свободный резерв времени, можно выполнять задельные работы.

Исходя из того, что каждая сборка E_t^j имеет свое расстояние до вершины RV_p^j и свой уровень вложенности V_p^j , очередь изготовления можно представить следующим образом:

$$NE_m^j = \left\lfloor \frac{DE_m^j - \min(DE_m^j)}{\max(DE_m^j) - \min(DE_m^j)} * 99 \right\rfloor * 100 + V_p^j + 1. \quad (6)$$

Полученная очередность изготовления будет использоваться при формировании методики решения задачи.

2 МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Пусть требуется изготовить некоторое множество изделий $\{I\} : I_i = \{E_j, C_j\}^i$. Из структуры изделия получаем необходимость изготовления множества деталей E_j , каждую из которых необходимо изготовить в количестве C_j экземпляров. При изготовлении детали E_j проводится набор операций, выполняемых последовательно без смены РЦ, $P_m^j = \{O_k, N_k\}^j$, где O_k – РЦ, используемый для выполнения операции, N_k – трудоемкость выполнения операции в нормо-часах на данном РЦ, m – номер этапа работы над деталью.

При выполнении работ необходимо учитывать следующие условия:

- 1) в составе разных изделий могут быть одни и те же детали $\exists i, j : \{E\}^i \cap \{E\}^j$;
- 2) нельзя нарушать порядок выполнения операций в процессе изготовления детали;
- 3) в один момент времени на одном РЦ можно изготавливать только одну деталь.

Основная задача: организовать максимально равномерную загрузку производства с минимальной продолжительностью процесса изготовления. Введем понятие коэффициента плотности изготовления детали E_j для изделия I_i :

$$K_j = \frac{N_j \cdot C_j}{Z_i}, \quad (7)$$

где Z_i – количество нормо-часов, выделенных по плану на изготовление изделия, N_j – трудоемкость изготовления детали.

Методика:

1) выбираем деталь с максимальным коэффициентом плотности изготовления, распределяем операции по ее изготовлению по РЦ;

2) для каждого РЦ образуются «окна простоя», которые характеризуются количеством нормо-часов;

3) выбираем максимальное «окно», подбираем деталь, норматив по изготовлению которой максимально близко подходит к размеру «окна» (но не превышает его), и сохраняется порядок выполнения операций над деталью;

4) распределяем процесс изготовления выбранной детали по РЦ;

5) переход на пункт 2.

Расчет эффективности загрузки РЦ O_j :

$$R_j = \frac{N_r}{N_a}, \quad (8)$$

где N_r – время работы РЦ, N_a – общее время, прошедшее с момента начала процесса изготовления до момента окончания изготовления последней детали.

Расчет длительности изготовления изделия I_i :

$S_i = \max(N_{a_i})$ – максимальное время работы по всем РЦ, занятым в изготовлении данного изделия, с начала работы до конца процесса изготовления последней детали.

Пример, в производство запускаются два изделия I_1 , I_2 со следующим составом:

Изделие (план)	Состав	Количество
I_1 (80 н/ч)	E_1	10
	E_2	2
	E_3	3
I_2 (120 н/ч)	E_1	2
	E_4	8
	E_5	5

Определяется норматив на изготовление деталей на каждом РЦ:

Деталь	Количество нормо-часов	РЦ
E_1	2	O_1
	3	O_2
	1	O_3
E_2	1	O_3
	2	O_2
E_3	8	O_4
E_4	2	O_1
	3	O_3
E_5	5	O_2

Изделие	Деталь	Коэффициент
I_1	E_1	$5*10/80=5/8$
	E_2	$2*3/80=3/40$
	E_3	$3*8/80=3/10$
I_2	E_1	$2*5/120=1/12$
	E_4	$8*5/120=1/3$
	E_5	$5*5/120=1/5$

Коэффициенты плотности изготовления деталей для каждого изделия:

Этапы распределения изготовления изделий по методике:

1. Возьмем деталь с максимальным коэффициентом плотности изготовления и максимальным уровнем вхождения в структуру изделия, распределим ее изготовление по РЦ, занятым в процессе изготовления в соответствии с техпроцессом. После этого отмечаем деталь как изготовленную.

РЦ	Изделие/деталь/№ этапа/нормо-часы				
O_1	I_1/E_1 /1/20				
O_2	Окно 20 н/ч	I_1/E_1 /2/30			
O_3	Окно 50 н/ч		I_1/E_1 /3/10		
O_4					

2. Возьмем следующую деталь из неизготовленных также с максимальным коэффициентом плотности изготовления и максимальным уровнем вхождения в структуру изделия, распределяем процесс ее изготовления по необходимым РЦ, стараясь занять «окна», оставшиеся после распределения РЦ для изготовления первой детали. И так далее.

РЦ	Изделие/деталь/№ этапа/нормо-часы				
O_1	Занято 20 н/ч				
O_2	I_2/E_5 /1/25	Занято 30 н/ч			
O_3	I_1/E_2 /1/2	Окно 48 н/ч	Занято 10 н/ч		
O_4	I_1/E_4 /1/24				

3. На конечном этапе получаем таблицу, каждая ячейка которой либо соответствует этапу изготовления конкретной детали либо является окном простоя РЦ.

РЦ	Изделие/деталь/№ этапа/нормо-часы				
O_1	Занято 20 н/ч				
O_2	Занято 25 н/ч	Занято 30 н/ч			
O_3	Занято 2 н/ч	Окно 48 н/ч	Занято 10 н/ч		
O_4	Занято 24 н/ч

Рис. 1. Пример распределения изделий по РЦ

На рисунке 1 приведен пример распределения 3 изделий по 5 РЦ с визуализацией времени использования РЦ на относительной временной шкале.

3 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

На рисунке 2 представлена схема исходных данных, взятых для расчетных экспериментов.

Рис. 2. Исходная схема базы данных (БД)

Для проведения расчетов приняты следующие допущения и добавлены данные:

- 1) время, требующееся на проведение данной операции, разделяется поровну между ПЦ, используемыми при выполнении операции;
- 2) каждый ПЦ представлен в единственном числе;
- 3) в таблицу TBL_TS добавлено поле T_ALL, в которое занесено время в нормоединицах, требуемое для изготовления изделия и вычисленное в зависимости от срока поставки изделия;
- 4) создана таблица OB_LIST – перечень оборудования в ПЦ с указанием кода операции и очередности оборудования при выполнении операции (каждая единица оборудования указана только один раз);

Запрос:

```
SELECT IDDOC AS OP_ID, SP2589 AS OB_NUMBER
INTO OB_LIST
FROM [SC].[DBO].[TBL_OPER_OBOR]
WHERE (NOT OBOR_ID IS NULL) AND (NOT OBOR_ID
LIKE '% 0 %')
```

ORDER BY IDDOC

5) создана предварительная результирующая таблица T_RES1, содержащая код ТС, код детали, ее уровень в структуре дерева изготовления изделия, норматив изготовления с учетом количества требуемых деталей, коэффициент плотности изготовления детали, признак готовности детали.

Запрос:

```
SELECT T1.[IPP],T1.[TS] ,T1.[CODE] AS DET,T1.[LEV] ,T1.
[KOL] ,
SUM(T1.[T_ALL]) AS ST,SUM(T1.[T_ALL]) AS KOEFF,
0 AS MAKED
INTO TBL_RES1
FROM [SC].[DBO].[TBL_OPER_STRUCT] AS T1
WHERE T1.KOL>0 AND T1.T_ALL>0
GROUP BY IPP,TS,CODE,LEV,KOL
```

```
UPDATE [SC].[DBO].[TBL_RES1]
SET KOEFF=10000*KOEFF/
```

```
(
SELECT T_ALL
FROM [SC].[DBO].[TBL_TS]
WHERE CODE_TS=[SC].[DBO].[TBL_RES1].TS
)
```

6) создан макет результирующей таблицы, содержащей перечень оборудования ПЦ, время начала (определено как 0) и окончания работы (определено как максимум из нормативов изготовления всех изделий), пустые поля для заполнения данных по коду ТС, коду детали, уровню детали в дереве изготовления изделия, коду операции, очередности ПЦ для данной операции:

Запрос:

```
SELECT [OB_NUMBER] ,0 AS T_BEG,
(
SELECT MAX(T_ALL)
FROM [SC].[DBO].[TBL_TS]
) AS T_END,
'-----' AS NUM_DET , '-----' AS NUM_TS ,
'-----' AS NUM_OPER , '-----' AS NUM_IPP,0
```

```
AS OB_ORDER ,0 AS LEV
INTO [SC].[DBO].[TBL_RES]
FROM [SC].[DBO].[OB_LIST]
GROUP BY OB_NUMBER
```

Общая схема алгоритма расчета представлена на рисунке 3.

Результатом работы алгоритма должна быть заполненная таблица T_RES, каждая строка которой определяет время проведения некоторой операции по изготовлению конкретной детали из состава конкретного изделия на конкретном ПЦ.

1) выбирается деталь с максимальным уровнем, максимальным коэффициентом плотности изготовления и нулевым признаком готовности.

Запрос:

```
SELECT * FROM [SC].[DBO].[TBL_RES1] AS T
WHERE (MAKED=0) AND
(LEV IN
```

```
(
SELECT MAX(LEV) AS MLEV FROM [SC].
[DBO].[TBL_RES1] AS T1
GROUP BY TS
))
ORDER BY KOEFF DESC
```

2) Составляется перечень операций, необходимых для изготовления данной детали с учетом ее принадлежности к изделию и ее уровню в структуре дерева изготовления.

Запрос:

```
SELECT ID_OPER FROM [SC].[DBO].[TBL_OPER_STRUCT]
WHERE (TS=[NUM_TS]) AND (CODE=[NUM_DET]) AND
(LEV=[NUM_LEV])
ORDER BY N_OPER
```

3) Для каждой операции выбирается перечень ПЦ.

Запрос:

```
SELECT OB_NUMBER, OB_ORDER
FROM OB_LIST
WHERE OP_ID=[NUM_OPER]
ORDER BY OB_ORDER
```

4) в результирующей таблице находится незанятая строка для данного ПЦ, так чтобы интервал времени в данной строке был не меньше, чем требуемый норматив, и время начала было минимальным.

Рис. 3. Схема алгоритма

Запрос:

```
SELECT * FROM TBL_RES
WHERE (OB_NUMBER=[NUM_OBOR])
      AND ((T_END-T_BEG)>=[TIME_OPER])
      AND (NUM_DET='-----')
      AND (NUM_TS='-----')
ORDER BY T_BEG, T_END-T_BEG, ID
```

5) если строка найдена, делим ее на две части – в одну записываем изготовление нужной детали с ее нормативом, начальное время второй строки ставим равным $t_{beg}+time$.

Запрос:

```
UPDATE TBL_RES SET T_END=T_BEG+[TIME] WHERE
ID=TBL_RES.ID
UPDATE TBL_RES SET NUM_DET=[NUM_DET] WHERE
ID=TBL_RES.ID
UPDATE TBL_RES SET NUM_TS=[NUM_TS] WHERE
ID=TBL_RES.ID
UPDATE TBL_RES SET NUM_OPER=[NUM_OPER]
WHERE ID=TBL_RES.ID
UPDATE TBL_RES SET OB_ORDER=[OB_ORDER] WHERE
ID=TBL_RES.ID
UPDATE TBL_RES SET LEV=[NUM_LEV] WHERE ID=TBL_RES.ID
```

6) если строка не найдена, добавляем изготовление новой строкой, где $t_{beg}=\max(t_{end})$ для данной операции.

Запрос:

```
INSERT INTO TBL_RES
(T_BEG,T_END,OB_NUMBER,NUM_DET,NUM_TS,
NUM_OPER)
VALUES
(T_BEG+[TIME],[T_END],[OB_NUMBER],NULL,
NULL,NULL)
```

7) признак готовности детали присваивается равным 1, алгоритм переходит на пункт 1.

Проверка эффективности работы алгоритма.

Проверка своевременности изготовления изделий осуществляется по значению максимального времени окончания операции для данного изделия.

Запрос:

```
SELECT CODE_PLAN, CODE_TS, (T_ALL-X.MT) AS RAZN
FROM TBL_TS
INNER JOIN
(
  SELECT MAX(T_END) AS MT, NUM_TS, NUM_IPP
  FROM TBL_RES WHERE NOT NUM_TS IS NULL
  GROUP BY NUM_TS, NUM_IPP
) AS X ON X.NUM_TS=LTRIM(RTRIM(CODE_TS))
      AND X.NUM_IPP=LTRIM(RTRIM(CODE_PLAN))
```

Проверка эффективности загрузки ПЦ проводится по наличию «окон» в работе – количество «окон».

Запрос:

```
SELECT COUNT(*), OB_NUMBER FROM TBL_RES
WHERE T_END<
(
  SELECT MAX(T_ALL) FROM TBL_TS
)
AND (NUM_DET IS NULL)
```

GROUP BY OB_NUMBER

Также подсчитывается общий размер «окон».

Запрос:

```
SELECT SUM(T_END-T_BEG), OB_NUMBER FROM TBL_RES
WHERE T_END<
(
  SELECT MAX(T_ALL) FROM TBL_TS
)
AND (NUM_DET IS NULL)
GROUP BY OB_NUMBER
```

Равномерность загрузки ПЦ определяется по времени работы каждого ПЦ либо по количеству изготовленных деталей.

Запрос:

```
SELECT [OB_NUMBER], MAX([T_END]) AS MT,
SUM([KOL]) AS SK
FROM [DBO].[TBL_RES]
WHERE NOT NUM_DET IS NULL
GROUP BY OB_NUMBER
ORDER BY SK
```

Также можно определить коэффициент отклонения от среднего значения загрузки.

Запрос:

```
SELECT OB_NUMBER, SUM(KOL)/V.AVGSK AS KOEFF
FROM TBL_RES,
(
  SELECT AVG(X.SK) AS AVGSK
  FROM
  (
    SELECT [OB_NUMBER], SUM(KOL) AS SK
    FROM [SC3].[DBO].[TBL_RES]
    GROUP BY OB_NUMBER
  ) AS X
) AS V
GROUP BY OB_NUMBER, V.AVGSK
ORDER BY KOEFF
```

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ

Для проведения экспериментальных расчетов был взят состав из 113 единиц изделий с различными сроками изготовления. По содержанию техпроцессов была выделена 4471 операция, выполняемая на 124 различных единицах оборудования.

В результате работы алгоритма получено распределение работ по РЦ со следующей оценкой эффективности:

- 1) окна простоя РЦ отсутствуют;
- 2) загрузка оборудования неравномерна (см. табл. 2), среднее значение загрузки составляет 306 деталей на РЦ;
- 3) по сроку изготовления изделий: около 16% изготовлены с опережением срока, остальные – с задержкой, которая обусловлена, в основном, использованием наиболее загруженных РЦ;
- 4) добавление по одной единице наиболее загруженных РЦ увеличивает долю изготовленных с опережением срока изделий до 31%, в два раза снижает сроки задержки изготовления остальной части изделий; добавление одной единицы (п. 9 табл. 2) и двух единиц (п. 10 табл. 2) увеличивает долю изготовленных с опережением срока изделий до 60%, снижает сроки задержки изготовления в 6 раз.

На рисунке 4 приведен сравнительный график загрузки оборудования с использованием параметров «время работы» и «количество деталей», значение коэффициента прологарифмировано для сглаживания масштаба изображения, для исключения перегруженности графика взяты 40 единиц оборудования из 124.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теория управления проектами позволяет применять свои методы для работы как с материальным результатом, так и с нематериальным. Данное понимание позволяет сформировать единый подход к разработке плана проектной организации, выпускающей машиностроительное оборудование, которое включает в себя как аппаратную, так и программную составляющие. В статье представлена модель процесса изготовления продукции, в которой используется расчет очередности изготовления сборочных единиц и деталей, основанный

Таблица 2

Равномерность загрузки оборудования

№ п/п	Количество РЦ	Количество изготовленных деталей, N	Коэффициент отклонения от среднего значения загрузки
1	77	$N < 100$	0,03–0,316
2	20	$100 \leq N < 200$	0,326–0,65
3	8	$200 \leq N < 300$	0,669–0,957
4	3	$300 \leq N < 400$	1,163–1,261
5	3	$400 \leq N < 600$	1,313–1,836
6	4	$600 \leq N < 900$	2,098–2,663
7	3	$900 \leq N < 1500$	3,13–3,816
8	2	$1500 \leq N < 2000$	4,918–5,509
9	1 (1YR H)	$N > 7000$	23,055
10	1 (1YR 26)	$N > 10000$	33,238

Рис. 4. Сравнительный график загрузки оборудования

на расстоянии от корня до вершины дерева структуры изделия, и оптимизационная методика формирования оперативного плана на производственном участке.

Основным недостатком модели является необходимость представления всего объема работ по изделию в виде дерева, что в практической деятельности не всегда возможно. В процессе изготовления могут быть как не оцененные работы, так и работы, выявленные в процессе изготовления.

Предложенная методика в части равномерной загрузки производства позволяет:

- увидеть перезагруженные РЦ и своевременно реагировать на простои и возможные срывы сроков изготовления;
- определить минимальное количество недостающих РЦ, добавление которых позволит обеспечить полностью своевременное выполнение производственного плана;
- снизить вычислительную сложность при проведении оптимизационных процедур над оперативным планом производственного участка;
- проводить расчет оперативного плана в короткие сроки, в том числе с учетом вновь введенных работ;
- модернизировать существующую систему автоматизации планирования производственной деятельности.

Таким образом, следует сказать, что предложенная методика позволяет повысить производительность и эффективность труда РЦ без существенных доработок используемой системы автоматизации планирования производственной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перцев А.А., Подобрий А.Н. Формирование и анализ плана производства машиностроительного предприятия // Автоматизация процессов управления. 2019. № 1 (55). С. 74–83.
2. Перцев А.А., Подобрий А.Н. Подход к автоматизированному формированию плана изготовления производственного подразделения проектной организации // Сб. науч. тр. 7-й Всерос. науч.-техн. конф. аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника» (ИВТ-2015), г. Ульяновск, 25–27 мая 2015. Ульяновск : УлГТУ, 2015. С. 398–405.
3. ГОСТ 14004-83. Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий. URL: http://www.complexdoc.ru/pdf/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2014.004-83/gost_14.004-83.pdf (дата обращения: 29.11.2020).
4. ГОСТ 2.053-2013. ЕСКД. Электронная структура изделия. URL: http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_2.053-2013 (дата обращения: 29.11.2020).
5. Перцев А.А., Подобрий А.Н. Алгоритм формирования посменно-суточного плана производства на основании плана изготовления изделия // Сб. науч. тр. XII международной науч.-практ. конф. «Актуальные научные достижения – 2016». Чехия, Прага, 2016. С. 106–112.

6. Фролов Е.Б., Загидуллин Р.Р. Оперативно-календарное планирование и диспетчирование в mes-системах. URL: <http://www.mashportal.ru/Default.aspx?tabid=124&newsType=articleview&ArticleID=10455> (дата обращения: 29.11.2020).

7. Manfred Schulte-Zurhausen. Organisation. Verlag Franz Vahlen, München 2014. 637p.

8. Непомнящий Е.Г. Планирование на предприятии. Конспект лекций. Таганрог : ТИУиЭ, 2011.

9. Родов А.С., Крутянский Д.И. План, поток, ритм : Новочеркас. электровозостроит. завод. Ростов н/Д : Кн. изд-во, 1964. 72 с.

10. Pertsev A., Podobrii A. Order sensivity model of the production plan in small-scale production of the design organization // Problems of Human-Computer Interaction. Collection of scientific pappers. Ulyanovsk : USTU, 2015. pp. 180–185.

11. Перцев А.А., Подобрий А.Н. Реализация интерактивного плана изготовления для мелкосерийного производства // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования : сб. науч. тр. VII Всерос. школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых (ИМАП-2015, г. Ульяновск, 27–28 октября 2015 г.) / под ред. А.Н. Афанасьева. Ульяновск : УлГТУ, 2015. С. 45–49.

REFERENCES

1. Pertsev A.A., Podobrii A.N. Formirovanie i analiz plana proizvodstva mashinostroitelnogo predpriiatiia [Production Planning of the Machine-Building Enterprise]. *Avtomatizatsiia protsessov upravleniia* [Automation of Control Processes], 2019, no. 1 (55), pp. 74–83.
2. Pertsev A.A., Podobrii A.N. Podkhod k avtomatizirovannomu formirovaniu plana izgotovleniia proizvodstvennogo podrazdeleniia proektnoi organizatsii [An Approach to Automated Plan Formation of a Production Unit in Project Organization]. *Sb. nauch. tr. 7-i Vseros. nauch.-tekhn. konf. aspirantov, studentov i molodykh uchenykh "Informatika i vychislitelnaia tekhnika"* (IVT-2015) [Proc. of 7th Russian Sci.-Tech. Conf. on Informatics and Computer Facilities for Postgraduate, Students, and Young Scientists (IVT-2015)]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015, pp. 398–405.
3. *GOST 14004-83. Tekhnologicheskaya podgotovka proizvodstva. Terminy i opredeleniia osnovnykh poniatii* [State Standard GOST 14004-83. Technological Preparation of Production. Terms and Definitions of Basic Concepts]. Available at: http://www.complexdoc.ru/pdf/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%2014.004-83/gost_14.004-83.pdf (accessed 29.11.2020).
4. *GOST 2.053-2013. ESKD. Elektronnaia struktura izdeliia* [State Standard GOST 2.053-2013. Unified System for Design Documentation. Product Electronic Structure. General Principles]. Available at: http://standartgost.ru/g/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_2.053-2013 (accessed 29.11.2020).
5. Pertsev A.A., Podobrii A.N. Algoritm formirovaniia posmenno-sutochnogo plana proizvodstva na osnovanii

plana izgotovleniia izdeliia [An Algorithm for Forming the Working Shift-Daily Plan of Production Based on the Product Manufacturing Plan]. *Sb. nauch. tr. XII mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konf. "Aktualnye nauchnye dostizheniia – 2016"* [Proc. of 12th Int. Sci.-Pract. Conf. on Actual Scientific Achievements]. Czechia, Praga, 2016, pp. 106–112.

6. Frolov E.B., Zagidullin R.R. *Operativno-kalendaroe planirovanie i dispetchirovanie v mes-sistemakh* [Deadlines and Short-Term Planning and Dispatching Control in Mes-Systems]. Available at: <http://www.mashportal.ru/Default.aspx?tabid=124&newsType=articleview&ArticleID=10455> (accessed 29.11.2020).

7. Manfred Schulte-Zurhausen. *Organisation*. Verlag Franz Vahlen, München, 2014. 637 p.

8. Nepomniashchii E.G. *Planirovanie na predpriatii. Konspekt lektsii* [Scheduling of Enterprise]. Taganrog, TIUE Publ., 2011.

9. Rodov A.S., Krutianskii D.I. *Plan, potok, ritm. Novocherkas. elektrovostroit. zavod* [Plan, Flow, Rhythm.

Novocherkassk Electric Locomotive Building Plant]. Rostov-on-Don, Knizhnoe Publ., 1964. 72 p.

10. Pertsev A., Podobrii A. Order Sensivity Model of the Production Plan in Small-Scale Production of the Design Organization. *Problems of Human-Computer Interaction. Collection of Scientific Papers*. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015, pp. 180–185.

11. Pertsev A.A., Podobrii A.N. Realizatsiia interaktivnogo plana izgotovleniia dlia melkoseriinogo proizvodstva [Implementation of an Interactive Manufacturing Plan for Small-Scale Production]. *Informatika, modelirovanie, avtomatizatsiia proektirovaniia. Sb. nauch. tr. VII Vseros. shkoly-seminara aspirantov, studentov i molodykh uchenykh (IMAP-2015, g. Ulyanovsk, 27–28 oktiabria 2015 g.) pod red. A.N. Afanaseva* [Proc. of 7th Russian Workshop for Postgraduate, Students, and Young Scientists on Informatics, Modeling, Computer-Aided Design. (IMAP-2015). A.N. Afanasev (Ed.)]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2015, pp. 45–49.