

Модель оптимизации загрузки парка станочного оборудования в рамках календарного года

И.Н. Хрусталева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы многокритериальной оптимизации планирования загрузки технологического оборудования на машиностроительном предприятии в рамках календарного года. Планирование и оптимизация загрузки технологического оборудования являются ключевыми задачами оперативно-календарного планирования на предприятиях машиностроения. В работе представлена модель оптимизации загрузки технологического оборудования, применяемого в производственном процессе. В рамках оптимизационной модели определены три группы целевых показателя: показатель эффективности группы технологического оборудования в рамках календарного года; показатель равномерности загрузки группы технологического оборудования в рамках календарного года; величина потерь от простоя группы технологического оборудования в рамках календарного года. В работе представлены результаты оптимизации загрузки парка станочного оборудования, применяемого в рамках цеха механической обработки. Проведена оптимизация загрузки для отдельных групп технологического оборудования: группа токарных станков, группа фрезерных станков, группа шлифовальных станков. Оптимизация загрузки оборудования производилась за счет перераспределения общей трудоемкости выполняемых работ для соответствующих групп технологического оборудования между подпериодами календарного года. Для определения оптимального варианта загрузки групп технологического оборудования был применен метод Парето-оптимизации. Определена следующая стратегия оптимизации: минимизация общей величины потерь от простоя технологического оборудования. В работе представлены графики фронтов Парето для целевых показателей для станков токарной группы. В результате проведенной оптимизации общая величина потерь для отдельных групп технологического оборудования, возникающая в результате простоя снизилась на 6,8%-10,2%. Таким образом, применение разработанной модели для решения задачи оптимизации загрузки парка станочного оборудования позволило повысить эффективность процесса оперативно-календарного планирования на машиностроительных предприятиях.

Ключевые слова: календарное планирование, многокритериальная оптимизация, парк станочного оборудования, целевые показатели, потери, загрузка технологического оборудования.

Введение

Оптимизация загрузки технологического оборудования является одной из ключевых задач оперативно-календарного планирования на машиностроительных предприятиях [1, 2]. Результатом неэффективного планирования может стать срыв в цепях поставок заготовок и полуфабрикатов для реализации производственного процесса [3, 4]. Другим

показателем снижения эффективности производственного процесса на предприятии в следствии некорректного планирования является увеличение потерь, связанных с простоем или перегрузкой технологического оборудования.

Эффективность оперативно-календарного планирования зависит от четкости и полноты построения модели анализируемого процесса, для которого производится разработка календарного плана [5, 6].

В настоящее время для решения задач календарного планирования широко применяются цифровые двойники [7-9], которые позволяют не только моделировать различные варианты исследуемого процесса, но и оптимизировать его параметры на основе установленного множества целевых показателей [10-12]. Метод многокритериальной оптимизации позволяет определить такое соотношение значений целевых показателей, которое будет являться оптимальным для исследуемого объекта с учетом заданных ограничений [13-15].

В основе процесса оптимизации лежит обработка большего объема данных [16-18], что приводит к необходимости комплексного внедрения цифровых технологий и интеллектуальных систем принятия решения на всех этапах производственного процесса [19, 20].

Целью работы является повышение эффективности процесса планирования загрузки парка технологического оборудования на предприятиях машиностроения. Задачей исследования является разработка модели, позволяющей повысить эффективность процесса планирования загрузки технологического оборудования на машиностроительных предприятиях. Объектом исследования является парк станочного оборудования. Предметом исследования являются показатели эффективности загрузки парка станочного оборудования в рамках календарного года.

Описание оптимизационной модели.

В рамках структурной модели объекта управления выделено p подпериодов, соответствующих календарным месяцам (рис.1).

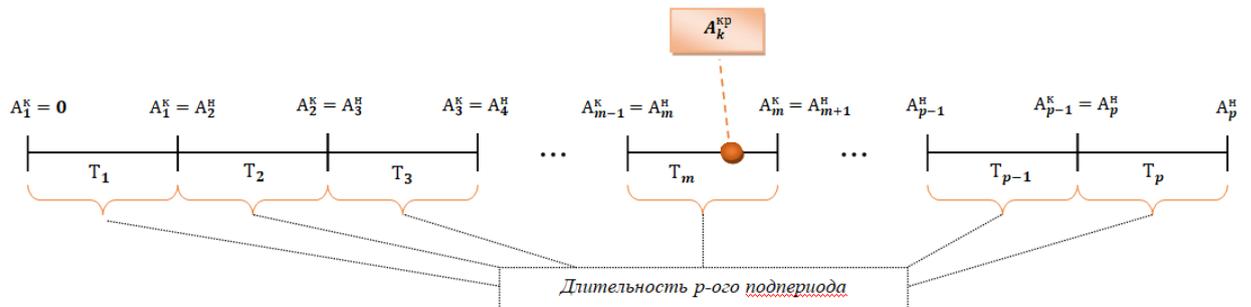


Рис. 1. – Структурная модель объекта управления.

Каждый подпериод календарного года может быть описан следующим набором параметров (1):

$$ПП_i = \langle NUM_i, K_i^{раб.дн.}, A_i^H, A_i^K, T_i \rangle, \quad (1)$$

где $ПП_i$ – i -й подпериод календарного года; NUM_i – номер i -го подпериода; $K_i^{раб.дн.}$ – количество рабочих дней в рамках i подпериода, дн.; A_i^H – значение начальной точки i -го подпериода, час; A_i^K – значение конечной точки i -го подпериода, час; T_i – продолжительность i подпериода, час.

Продолжительности i -го подпериода рассчитывается по формуле (2):

$$T_i = \sum_{j=1}^q (T_j^{раб.дн.}), \quad (2)$$

где $T_j^{раб.дн.}$ – продолжительность j -го рабочего дня, расположенного в рамках i -го подпериода, час.; q – количество рабочих дней в рамках i -го подпериода, шт.

Значения начальной и конечной точек i -го подпериода определяются по формулам (3) -(4):

$$A_i^H = \sum_{i=1}^{p-1} T_i, \quad (3)$$

$$A_p^K = A_i^H + T_i, \quad (4)$$

где p – номер анализируемого подпериода.

Минимальное количество подпериодов, в рамках которых может быть изготовлена i -я партия изделий определяется, исходя из анализа следующих параметров:

- продолжительность производственного цикла изготовления k -й партии изделий - $(T_{\text{пц}})_k$, час.;
- продолжительность i -го подпериода, в рамках которого располагается критическая временная точка $A_k^{\text{кр}}$ для k -й партии изделий - $(T_k^{A^{\text{кр}}})_i$, час.;

В рамках оптимизационной модели критической временной точкой для k -й партии изделий $A_k^{\text{кр}}$ является период времени в рамках календарного года, при достижении которого производственный цикл для рассматриваемой партии изделий должен быть полностью завершен.

С точки зрения календарного планирования процесс изготовления k -й партии изделий может иметь два варианта реализации производственного цикла (рис.2):

- Обработка k -й партии изделий реализуется только в рамках подпериода, в пределах которого располагается критическая временная точка $A_{ij}^{\text{кр}}$.
- Обработка k -й партии изделий реализуется в рамках нескольких подпериодов.

Реализация первого варианта допустима только в том случае, когда продолжительность производственного цикла изготовления k -ой партии изделий $(T_{\text{пц}})_k$ не превышает величины периода времени от начала i -го подпериода, в рамках которого располагается критическая временная точка $(A_k^{A^{\text{кр}}})_i$, до критической временной точки $A_k^{\text{кр}}$ (5):

$$(T_{\text{пц}})_k \leq A_k^{\text{кр}} - (A_k^{A^{\text{кр}}})_i. \quad (5)$$

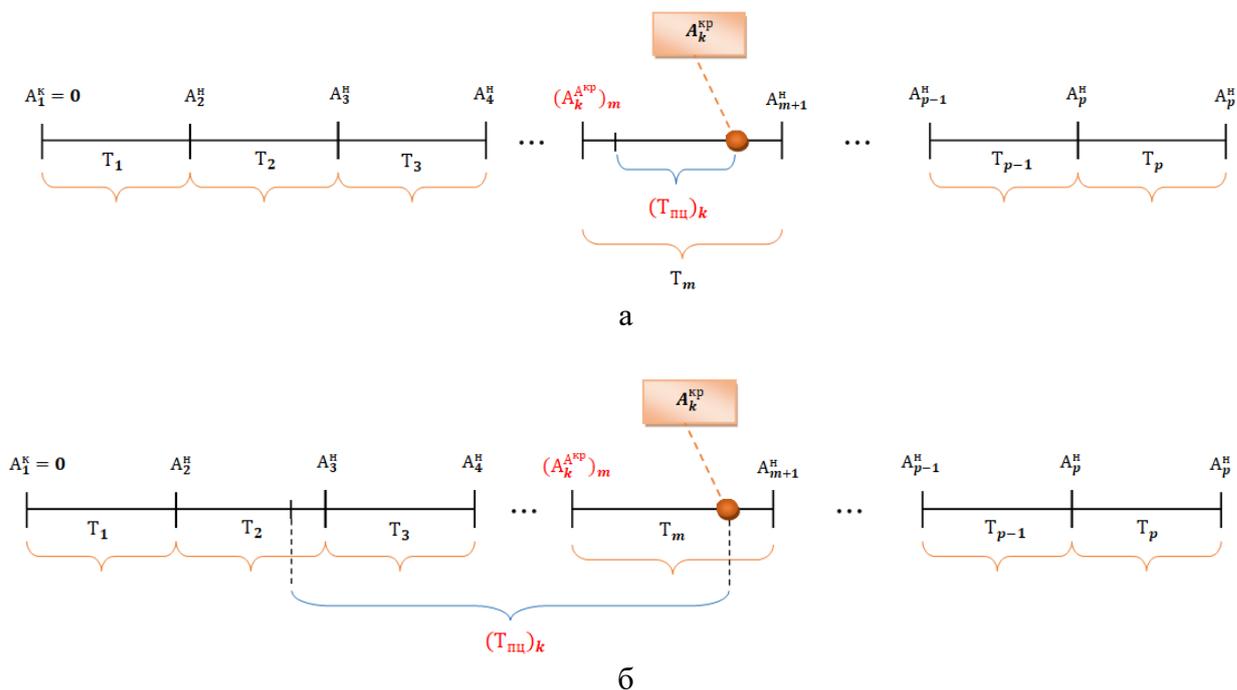


Рис. 2. – Варианты реализации производственного цикла по изготовлению партии изделий: а - обработка k -й партии изделий реализуется в рамках одного подпериода, в пределах которого располагается критическая временная точка; б - обработка k -й партии изделий реализуется в рамках нескольких подпериодов.

В случае, если продолжительность производственного цикла по изготовлению k -й партии изделий $(T_{\text{пц}})_k$ превышает величину периода времени, расположенного между точками A_k^{KP} и $(A_k^{\text{A KP}})_i$, то реализуется второй вариант календарного планирования производственного процесса (6):

$$(T_{\text{пц}})_k \geq A_k^{\text{KP}} - (A_k^{\text{A KP}})_i. \quad (6)$$

Таким образом, выбор варианта календарного планирования производственного процесса может быть описан в виде (7):

$$f(x) = \begin{cases} 1, & (T_{\text{пц}})_k \leq A_k^{\text{KP}} - (A_k^{\text{A KP}})_i \\ (n_k^{\text{пер}})_{\text{min}}, & (T_{\text{пц}})_k > A_k^{\text{KP}} - (A_k^{\text{A KP}})_i \end{cases}. \quad (7)$$

В случае реализации второго варианта календарного планирования производственного процесса минимальное количество подпериодов, в рамках которых может быть изготовлена k -я партия изделий определяется по формуле (8):

$$(n_k^{\text{пер}})_{\min} = 1 + \frac{N_k^{\text{пар}} \cdot \sum_{n=1}^f \frac{(t_k^{\text{КОД}})_n}{60} + \sum_{s=1}^h \frac{(t_k^{\text{КПЗД}})_s}{60} + \sum_{m=1}^g \frac{(t_k^{\text{ТР}})_m}{60} - \sum_{j=1}^q (T_j^{\text{раб.дн.}})^{\text{Акр}}}{T_{\text{ср}}^{\text{III}}}, \quad (8)$$

где $(n_k^{\text{пер}})_{\min}$ – минимальное количество подпериодов, необходимых для изготовления k -й партии изделий, шт.; $(t_k^{\text{КОД}})_n$ – трудоемкость реализации n -го комплекса основных действий для единицы изделия из k -й партии, мин.; $N_k^{\text{пар}}$ – величина k -й партии, шт.; $(t_k^{\text{КПЗД}})_s$ – трудоемкость реализации s -го комплекса подготовительно-заключительных действий для k -й партии изделий, мин.; $(t_k^{\text{ТР}})_m$ – трудоемкость выполнения m -й транспортной операции для k -й партии изделий, мин.; $(T_j^{\text{раб.дн.}})^{\text{Акр}}$ – продолжительность j -го рабочего дня, расположенного в рамках подпериода с критической временной точкой, ч.; $T_{\text{ср}}^{\text{III}}$ – среднее значение продолжительности подпериода, час.; f – количество комплексов основных действий в структуре производственного цикла для k -й партии изделий, шт.; g – количество транспортных операций в структуре производственного цикла для k -й партии изделий, шт.; q – количество рабочих дней в рамках подпериода, в пределах которого расположена критическая временная точка для k -й партии изделий, шт.; h – количество комплексов подготовительно-заключительных действий в структуре производственного цикла для k -й партии изделий, шт.

Для исследуемого объекта определены следующие задачи оптимизации:

- оптимизация эффективности загрузки парка станочного оборудования в рамках календарного года;
- оптимизация величины производственных потерь от простоя парка станочного оборудования в рамках календарного года;

- оптимизация равномерности загрузки парка станочного оборудования в рамках календарного года.

В рамках оптимизационной модели определена следующая группа целевых показателей:

- Показатель эффективности загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года – $(P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_{1...t}$.
- Среднее значение показателя равномерности загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года – $(P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_{1...t}^{\text{ср}}$;
- Величина потерь от простоя технологического оборудования t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года – $(\Pi_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_{(1...t)(1...i)}$.

Таким образом, определена следующая структура векторного критерия оптимизации (9):

$$F^{\text{ПСО}}(U^{\text{ПСО}}) = ((P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_{1...t}(U^{\text{ПСО}}), (P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_{1...t}^{\text{ср}}(U^{\text{ПСО}}), (\Pi_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_{(1...t)(1...i)}(U^{\text{ПСО}})), \quad (9)$$

где $F^{\text{ПСО}}$ – векторный критерий оптимизации загрузки парка станочного оборудования; $U^{\text{ПСО}}$ – множество параметров управления для оптимизации загрузки парка станочного оборудования;

Расчет показателя эффективности загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года производится по формуле (10):

$$(P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t = \sum_{i=1}^p ((k_{\text{загр.}}^{\text{ГТО}})_{ti} \cdot \alpha_i) = \sum_{i=1}^p ((k_{\text{загр.}}^{\text{ГТО}})_{ti} \cdot \frac{(F_3^{\text{ГТО}})_{ti}}{\sum_{i=1}^p (F_3^{\text{ГТО}})_{ti}}), \quad (10)$$

где $((k_{\text{загр.}}^{\text{ГТО}})_{ti})$ – коэффициент загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках i -го подпериода; α_i – удельный вес i -го подпериода в рамках календарного года; $(F_3^{\text{ГТО}})_{ti}$ – эффективный фонд рабочего времени для t -й группы технологического оборудования в рамках i -го подпериода, час.; p – количество подпериодов в рамках календарного года, шт.

Расчет среднего значения показателя равномерности загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года производится по формуле (11):

$$(P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_t^{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^p (\delta_{\text{загр.ГТО}}^{\text{ПП}})_{ti}}{p} = \frac{\sum_{i=1}^p \left(\frac{(k_{\text{загр.баз}}^{\text{ПП}})_t - (k_{\text{загр.факт}}^{\text{ПП}})_{ti}}{(k_{\text{загр.баз}}^{\text{ПП}})_t} \right)}{p}, \quad (11)$$

где $(\delta_{\text{загр.ГТО}}^{\text{ПП}})_{ti}$ – величина отклонения коэффициента загрузки t -й группы технологического оборудования базового значения в рамках i -го подпериода; $(k_{\text{загр.баз}}^{\text{ПП}})_t$ – базовое значение коэффициента загрузки t -й группы технологического оборудования; $(k_{\text{загр.факт}}^{\text{ПП}})_{ti}$ – величина фактического значения коэффициента загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках i -го подпериода; p – количество подпериодов в рамках календарного года, шт.

Базовое значение коэффициента загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года рассчитывается по формуле (12):

$$(k_{\text{загр.баз}}^{\text{ПП}})_{ti} = \frac{\sum_{n=1}^d \frac{(N_t^{\text{пар}})_n (t_t^{\text{КОД}})_n}{60} + \sum_{s=1}^r \frac{(t_t^{\text{КПЗД}})_s}{60}}{\sum_{i=1}^p (F_3^{\text{ГТО}})_{ti}}, \quad (12)$$

где $(N_t^{\text{пар}})_n$ – величина n -й партии изделий, изготавливаемой с применением технологического оборудования t -й группы, шт.; $(t_t^{\text{КОД}})_n$ – продолжительность комплекса основных действий для одной единицы изделия из n -й партии, реализуемого с применением технологического оборудования t -й группы, мин.; $(t_t^{\text{КПЗД}})_s$ – продолжительность s -го комплекса подготовительно-заключительных действий, реализуемого на технологическом оборудовании t -й группы, мин.; $(F_3^{\text{ГТО}})_{ti}$ – эффективный фонд рабочего времени для t -й группы технологического оборудования в рамках i -го подпериода, час.; d – количество комплексов основных действий, реализуемых с применением технологического оборудования t -й группы, шт.; r – количество комплексов подготовительно-заключительных действий, реализуемых с применением

технологического оборудования t -й группы, шт.; p – количество подпериодов в календарном году, шт.

Величина фактического значения коэффициента загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках i -го подпериода рассчитывается по формуле (13):

$$(k_{\text{загр.факт}}^{\text{ПП}})_{ti} = \frac{\sum_{n=1}^z \frac{(N_t^{\text{пар}})_n \cdot (t_t^{\text{КОД}})_n}{60} + \sum_{s=1}^w \frac{(t_t^{\text{КПЗД}})_s}{60}}{(F_3^{\text{ГТО}})_{ti}}, \quad (13)$$

где z - количество комплексов основных действий, реализуемых с применением технологического оборудования t -й группы в рамках i -го подпериода, шт.; w – количество комплексов подготовительно-заключительных действий, реализуемых с применением технологического оборудования t -й группы в рамках i -го подпериода, шт.

Величина потерь от простоя технологического оборудования t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года рассчитывается по формуле (14):

$$(\Pi_{\text{пр.ТО}}^{\text{ГТО}})_t = \sum_{i=1}^p (\Pi_{\text{пр.ТО}}^{\text{ГТО}})_{ti} = \sum_{i=1}^p ((C_i^{\text{пот}})_t \cdot (F_3^{\text{ГТО}})_{ti} \cdot (1 - (k_{\text{загр.факт}}^{\text{ПП}})_{ti})) \quad (14)$$

где $(\Pi_{\text{пр.ТО}}^{\text{ГТО}})_{ti}$ – величина потерь, возникающая по причине простоя t -й группы технологического оборудования в рамках i -го подпериода, руб.; p – количество подпериодов в рамках календарного года, шт.

В рамках исследования определены следующие критерии оптимизации и граничные условия реализации модели:

- Критерии оптимизации: $(P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t \rightarrow \max$; $(P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_t^{\text{CP}} \rightarrow \min$; $(\Pi_{\text{пр.ТО}}^{\text{ГТО}})_t \rightarrow \min$

- Граничные условия реализации модели (15)-(20):

$$(A_{\text{fin}}^{\text{K}})_k \leq A_k^{\text{KP}} ; \quad (15)$$

$$(A_k^{\text{H}})_{n+1} - (A_k^{\text{K}})_n \geq \frac{(T_k^{\text{TP}})_{n \rightarrow n+1}}{60}; \quad (16)$$

$$((P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t)_{\min} \leq (P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t \leq ((P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t)_{\max}; \quad (17)$$

$$((P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_t^{\text{CP}})_{\min} \leq (P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_t^{\text{CP}} \leq ((P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_t^{\text{CP}})_{\max}; \quad (18)$$

$$((I_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_t)_{\min} \leq (I_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_t \leq ((I_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_t)_{\max}; \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^u (I_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_t \leq (I_{\text{прост.}}^{\text{ПСО}})_{\text{баз}}, \quad (20)$$

где $(A_{\text{fin}}^k)_k$ – значение точки на оси времени в рамках календарного года, соответствующей окончанию реализации комплекса основных действий для k -й партии изделий, час; $(A_k^H)_{n+1}$ – значение точки на оси времени в рамках календарного года, соответствующей началу реализации $(n+1)$ -го комплекса основных действий для k -й партии изделий, час; $(A_k^K)_n$ – значение точки на оси времени в рамках календарного года, соответствующей окончанию реализации n -го комплекса основных действий для k -й партии изделий, час; $(T_k^{\text{Тр}})_{n \rightarrow n+1}$ – продолжительность реализации транспортной операции по перемещению груза между рабочими местами, где выполняются n -й и $(n+1)$ -й комплексы основных действий, мин.; $((P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t)_{\min}$, $((P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t)_{\max}$ – минимальное максимальное значения показателей эффективности загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года; $((P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_t^{\text{CP}})_{\min}$, $((P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_t^{\text{CP}})_{\max}$ – минимальное максимальное значения показателей равномерности загрузки t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года; $((I_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_t)_{\min}$, $((I_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_t)_{\max}$ – минимальное максимальное значения величин потерь от простоя технологического оборудования для t -й группы технологического оборудования в рамках календарного года, руб.; $(I_{\text{прост.}}^{\text{ПСО}})_{\text{баз}}$ – базовое значение величины потерь от простоя технологического оборудования, руб.; u – количество групп технологического оборудования, шт.

Определена следующая структура математической модели для оптимизации периодов запуска партий изделий в производство в рамках календарного года (21):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 (P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t = \sum_{i=1}^p ((k_{\text{загр}}^{\text{ГТО}})_{ti} \cdot \frac{(F_3^{\text{ГТО}})_{ti}}{\sum_{i=1}^p (F_3^{\text{ГТО}})_{ti}}) \rightarrow \max \\
 (P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})^{\text{ср}}_t = \frac{\sum_{i=1}^p \left(\frac{|(k_{\text{загр.баз}}^{\text{ПП}})_t - (k_{\text{загр.факт}}^{\text{ПП}})_{ti}|}{(k_{\text{загр.баз}}^{\text{ПП}})_t} \right)}{p} \rightarrow \min \\
 (II_{\text{просм.}}^{\text{ГТО}})_t = \sum_{i=1}^p ((C_{\text{ч}}^{\text{пот}})_t \cdot (F_3^{\text{ГТО}})_{ti} \cdot (1 - (k_{\text{загр.факт}}^{\text{ПП}})_{ti})) \rightarrow \min \\
 \sum_{t=1}^u (II_{\text{просм.}}^{\text{ГТО}})_t \leq (II_{\text{просм.}}^{\text{ПСО}})_{\text{баз}} \\
 (A_{\text{фин}}^{\text{к}})_k \leq A_k^{\text{кр}} \\
 (A_k^{\text{н}})_{j+1} - (A_k^{\text{к}})_j \geq \frac{(T_k^{\text{Тр}})_{j \rightarrow j+1}}{60} \\
 ((P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t)_{\min} \leq (P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t \leq ((P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t)_{\max} \\
 ((P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})^{\text{ср}})_t)_{\min} \leq (P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})^{\text{ср}}_t \leq ((P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})^{\text{ср}})_t)_{\max} \\
 ((II_{\text{просм.}}^{\text{ГТО}})_t)_{\min} \leq (II_{\text{просм.}}^{\text{ГТО}})_t \leq ((II_{\text{просм.}}^{\text{ГТО}})_t)_{\max}
 \end{array} \right. \quad (21)$$

В рамках оптимизационной модели определено следующее множество параметров управления (22):

$$U^{\text{ПСО}} = \{(T_t^{\text{КОД}})_{1...i}, (F_{\text{эф}}^{\text{ГТО}})_{1...t}\}, \quad (22)$$

где $(T_t^{\text{КОД}})_{1...i}$ - общая величина трудоемкости выполнения комплексов основных действий, реализуемых в рамках i -го подпериода с применением технологического оборудования t -й группы, час.; $(F_{\text{эф}}^{\text{ГТО}})_{1...t}$ - величина эффективного фонда рабочего времени в рамках календарного года для t -й группы технологического оборудования, час.

Оптимизация параметров загрузки парка станочного оборудования

На основе разработанной математической модели решена задача по оптимизации загрузки технологического оборудования в производственном подразделении, в рамках которого реализуются операции по механической обработке изделий с применением трех групп металлообрабатывающего оборудования: группа токарных станков, группа фрезерных станков, группа круглошлифовальных станков. В таблице 1 представлены значения отдельных параметров для рассматриваемых групп технологического оборудования.

Таблица №1.

Значение параметров для рассматриваемых групп технологического оборудования

№ п/п	Наименование параметра	Группа технологического оборудования		
		Группа токарных станков	Группа фрезерных станков	Группа шлифовальных станков
1	Количество единиц технологического оборудования, шт.	3	4	4
2	Общая трудоемкость технологических операций, час.	11904	15872	16987
3	Потери от простоя единицы технологического оборудования, руб./час.	410	325	245
4	Количество расчетных подпериодов в рамках календарного года, шт.	12	12	12
5	Базовое значение коэффициента загрузки	0,727	0,704	0,739
6	Эффективный фонд рабочего времени для группы технологического оборудования, ч.	12910	13173	8690

Исходное состояние системы имело следующие значения целевых показателей:

- Группа токарного оборудования: $(P_{эф.загр}^{ГТО})_1 = 0,103$; $(P_{равн.загр}^{ГТО})_1^{ср} = 0,107$; $(\Pi_{прост.}^{ГТО})_1 = 0,97$ млн.
- Группа фрезерного оборудования: $(P_{эф.загр}^{ГТО})_2 = 0,112$; $(P_{равн.загр}^{ГТО})_2^{ср} = 0,185$; $(\Pi_{прост.}^{ГТО})_2 = 0,834$.
- Группа круглошлифовального оборудования: $(P_{эф.загр}^{ГТО})_3 = 0,101$; $(P_{равн.загр}^{ГТО})_3^{ср} = 0,145$; $(\Pi_{прост.}^{ГТО})_3 = 0,581$.

Для решения поставленной задачи определена следующая стратегия оптимизации (23):

$$(P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_t \rightarrow \min \quad (23)$$

На рис.3 представлены графики фронта Парето для целевых показателей группы токарного оборудования.

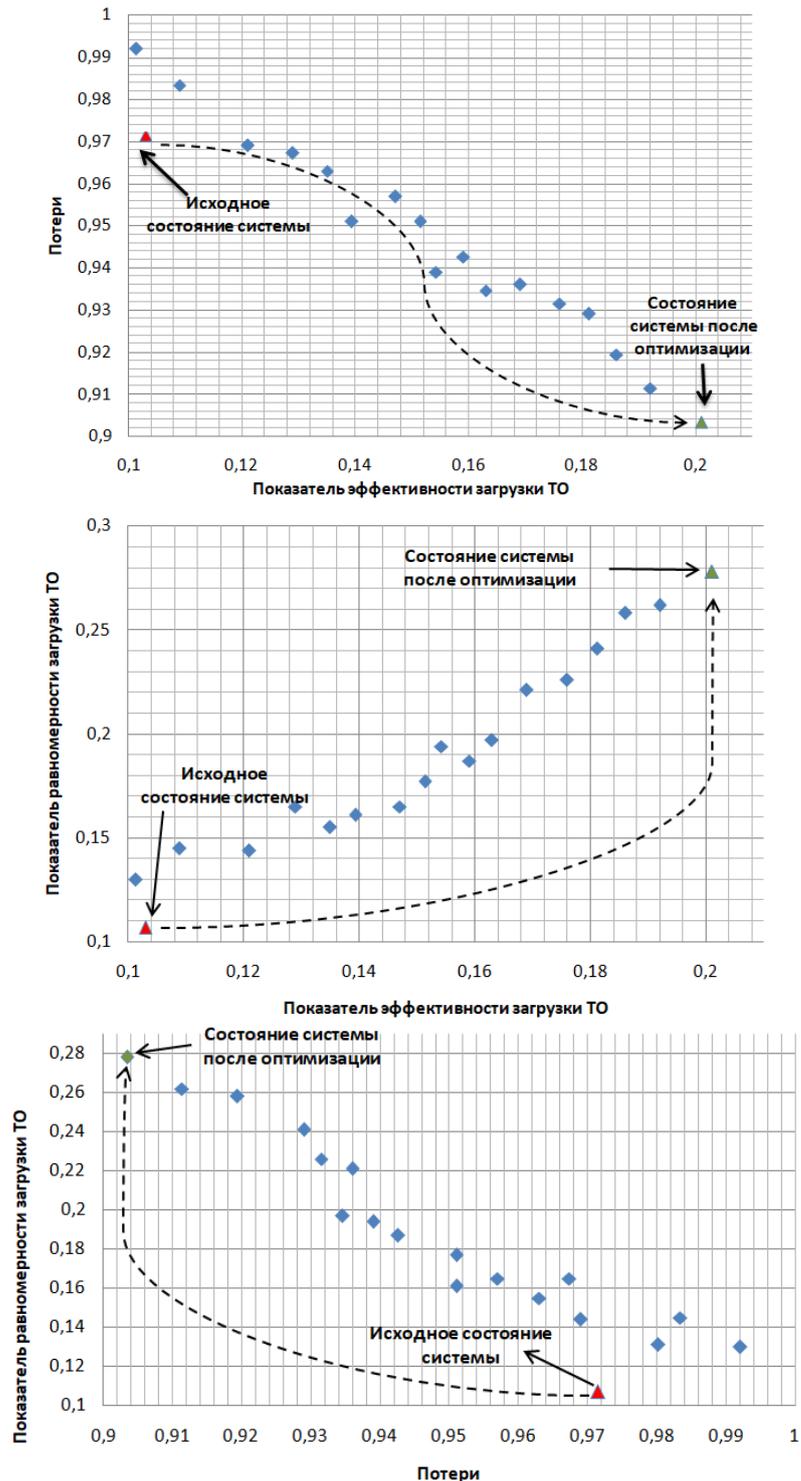


Рис. 3. – Графики фронта Парето для целевых показателей группы токарного оборудования

Выводы

Согласно выбранной стратегии оптимизации (23), определены следующие оптимальные значения целевых показателей для соответствующих групп технологического оборудования:

- Группа токарного оборудования: $(P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_1 = 0,201$; $(P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_1^{\text{CP}} = 0,278$; $(\Pi_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_1 = 0,903$.
- Группа фрезерного оборудования: $(P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_2 = 0,163$; $(P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_2^{\text{CP}} = 0,196$; $(\Pi_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_2 = 0,749$ млн.
- Группа круглошлифовального оборудования: $(P_{\text{эф.загр}}^{\text{ГТО}})_3 = 0,135$; $(P_{\text{равн.загр}}^{\text{ГТО}})_3^{\text{CP}} = 0,174$; $(\Pi_{\text{прост.}}^{\text{ГТО}})_3 = 0,749$ млн.

По результатам проведенной оптимизации величина потерь от простоя технологического оборудования снизилась на 6,8% - 10,2%.

Оптимизация параметров системы производилась за счет перераспределения общей трудоемкости выполнения технологических операций между отдельными подпериодами для соответствующих групп технологического оборудования. В рамках исследования изменение эффективного фонда рабочего времени не производилось: $(F_3^{\text{ГТО}})_{1...t} = \text{const}$.

Литература (References)

1. Cheng Q., Kan H., Ren J., Liu Zh., Zhang Y., Cheng Ch. Multi-objective optimization method for cross-workshop linkage production of partially flexible free-forging with forward single-machine scheduling // Computers & Industrial Engineering. 2024. V. 196. URL: doi.org/10.1016/j.cie.2024.110508.
2. Zhang L., Wang H., Liu W., Liang Ch., Wen X., Wang H., Zhao X., Chen L. Integrated optimization of production and maintenance scheduling with third-party

worker resource constraints in distributed parallel machines environment // Computers & Industrial Engineering. 2024. URL: doi.org/10.1016/j.cie.2024.110647.

3. Zhu X., Cao Y., Wu J., Liu H., Bei X. Optimum operational schedule and accounts receivable financing in a production supply chain considering hierarchical industrial status and uncertain yield // European Journal of Operational Research. 2022. V.302(3). pp. 1142-1154.

4. Huang J., Yang W., Tu Y. Financing mode decision in a supply chain with financial constraint // International Journal of Production Economics. 2020. V.220. URL: doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.014.

5. Ghaleb M., Zolfagharinia H., Taghipour Sh. Real-time production scheduling in the Industry-4.0 context: Addressing uncertainties in job arrivals and machine breakdowns // Computers & Operations Research. 2020. V.123. URL: doi.org/10.1016/j.cor.2020.105031.

6. Framinan J.M., Fernandez-Viagas V., Perez-Gonzalez P. Using real-time information to reschedule jobs in a flowshop with variable processing times // Computers & Industrial Engineering. 2019. V.129. pp. 113-125.

7. Kim W., Youn B.D. Physics-based digital twin updating and twin-based explainable crack identification of mechanical lap joint // Reliability Engineering & System Safety. 2025. V.253. URL: doi.org/10.1016/j.ress.2024.110515.

8. Liu J., Zhang Y., Liu Zh., Leng J., Zhou H., Gu Sh., Liu X. Digital twins enable shipbuilding // Alexandria Engineering Journal. 2024. V.107. pp. 915-931.

9. Wang Y., Jiang Z., Wu Y. Model construction of material distribution system based on digital twin // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. V.121(7-8). pp. 4485-4501.

10. Gao Y.P., Chang D.F., Chen C.H., Xu Z.Y. Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling // Advanced Engineering Informatics. 2022. V. 51. URL: doi.org/10.1016/j.aei.2021.101477.

11. Sun X.M., Bao J.S., Li J., Zhang Y.M., Liu S.M., Zhou B. A digital twin-driven approach for the assembly-commissioning of high precision products // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2020. V.61. URL: doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101839.

12. Shen X.-N., Yao X. Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems // Information Sciences. 2015. V.298. pp. 198-224.

13. Ding J.-Y., Song Sh., Wu Ch. Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization // European Journal of Operational Research. 2016. V.248(3). pp. 758-771.

14. Ghaleb M., Taghipour Sh., Zolfagharinia H. Real-time integrated production-scheduling and maintenance-planning in a flexible job shop with machine deterioration and condition-based maintenance // Journal of Manufacturing Systems. 2021. V.61. pp. 423-449.

15. Ghaleb M., Taghipour Sh., Zolfagharinia H. Real-time production scheduling in the Industry-4.0 context: Addressing uncertainties in job arrivals and machine breakdowns // Computers & Operations Research. 2020. V.123. URL: doi.org/10.1016/j.cor.2020.105031.

16. Mohanty A., Ramasamy A.K., Verayiah R., Bastia S., Dash S.S., Soudagar M.E.M., Khan T.M.Y., Cuce E. Smart grid and application of big data: Opportunities and challenges // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2024. V. 71. URL: doi.org/10.1016/j.seta.2024.104011.

17. Mollica L., Leli C., Sottotetti F., Quaglini S., Locati L.D., Marceglia S. Digital twins: a new paradigm in oncology in the era of big data // ESMO Real World Data and Digital Oncology. 2024. V.5. URL: doi.org/10.1016/j.esmorw.2024.100056.

18. Jin L., Zhai X., Wang K., Zhang K., Wu D., Nazir A., Jiang J., Liao W.-H. Big data, machine learning, and digital twin assisted additive manufacturing: A



review // Materials & Design. 2024. V.244. URL:
doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113086.

19. Waqar A. Intelligent decision support systems in construction engineering: An artificial intelligence and machine learning approaches // Expert Systems with Applications. 2024. V.249(A). URL: doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123503.

20. Mallia J., Francalanza E., Xuereb P., Baldacchino D., Refalo P. Intelligent optimisation in smart and sustainable compressed air systems: Towards support for decision-making under faulty conditions // Procedia CIRP. 2024. V.122. pp. 635-640.

Дата поступления: 8.02.2025

Дата публикации: 15.03.2025