

УДК 519.876.2

**АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ГРАФИКА ПЛАНОВО-
ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РЕМОНТНЫХ РАБОТ**

Р.Р. Исмагилов¹, Е.А. Миронченко², А.Л. Руцков²

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н., М.Е. Семёнов¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050,

²Филиал АО «УК ЭФКО» в Воронеже,

Россия, г. Воронеж, ул. Таранченко, 40, 394018

E-mail: rri10@tpu.ru

OPTIMAL PREVENTIVE MAINTENANCE SCHEDULE CREATING ALGORITHM

R.R. Ismagilov¹, E.A. Mironchenko², A.L. Rutskov²

Scientific Supervisor: Ass. Prof., PhD, M.E. Semenov¹

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050,

²Branch of JSC "UK EFKO" in Voronezh, Russia, Voronezh, Taranchenko St., 40, 394018

E-mail: rri10@tpu.ru

Abstract. *This article provided a formal statement and algorithm of solving preventive maintenance schedule optimization problem. The algorithm output is the preventive maintenance schedule minimizing the sum of depreciated cost of repaired technological units and machine downtimes. The computational complexity of the proposed algorithm is polynomially dependent on the size of the input data - number of technological units and number of planned repairs.*

Введение. Система планово-предупредительного ремонта (ППР) является наиболее надёжным подходом к организации и планированию технического обслуживания и ремонтов оборудования на производственных площадках [1]. Данный метод позволяет поддерживать заданный уровень исправности и работоспособности оборудования, т.к. предполагает проводить замены деталей оборудования без учёта его реального состояния. Однако существенным недостатком системы ППР является высокая стоимость обслуживания и рост эксплуатационных расходов, что делает метод экономически неэффективным при отсутствии должного обоснования.

Целью работы является постановка задачи оптимизации для формирования графика ППР и разработка алгоритма ее решения.

Формализация задачи. Для постановки задачи оптимизации выделим сущности, фигурирующие при планировании ремонтных работ: а) *функциональный элемент* – полнофункциональный агрегат в составе технологического объекта (например, насос, электродвигатель, теплообменник), б) *деталь* – составная часть оборудования, обеспечивающая его корректную работу (например, подшипник, торцевое уплотнение, ротор электродвигателя), в)

ремонт – дата ППР, назначенная лицом, принимающим решение. Далее введём следующие обозначения. Пусть N – множество всех деталей секции производственной площадки, $|N|=n$. Элементы множества N обладают следующими атрибутами:

1. $N_{T_{critical}} \in R$ – количество часов до прогнозной выработки ресурса;
2. $N_{T_{current}} \in R_+$ – текущая наработка ресурса (в часах);
3. $N_{status} \in \{0;1\}$ – индикатор, указывающий на принадлежность детали сборке;
4. $N_{T_{group}} \in R_+$ – время ремонта детали вместе с другими деталями агрегата;
5. $N_{T_{alone}} \in R_+$ – время одиночного ремонта детали, причём $N_{T_{alone}} > N_{T_{group}}$;
6. $N_p \in R_+$ – стоимость детали без учёта инфляции;
7. $N_\Delta \in R_+$ – допустимая задержка замены детали (в часах).

Пусть $M \in R_+$ – множество часов от текущего времени до плановой даты ремонта, $|M|=m$; $A = (N_{i_{critical}} - M_j)_{i,j=1}^{n,m} \in R$ – матрица остаточного ресурса на момент ремонта; $B = (N_{i_{critical}} - N_{i_{current}})_i^n \in R_+$ – вектор полного ресурса; $K = \left(\frac{A_{ij}}{B_i} \right)_{i,j=1}^{n,m} \in R$ – матрица остаточной ресурсности (в процентах), $z = \{z_i \mid K_{iz_i} = \min(|K_i|), i = \overline{1, n}\} \in N$ – вектор индексов столбцов с минимальной остаточной ресурсностью, $I = (\delta_{z,j})_{i,j=1}^{n,m}$ – матрица бинарного отношения на $N \times M$, $I_{ij} \in \{0;1\}$; $C = (N_{i_{status}})_{i=1}^n$ – вектор-индикатор режима ремонта, где 0 – одиночный, 1 – групповой, $T = (I_{ij} \cdot C_i \cdot N_{i_{group}})_{i,j=1}^{n,m} + (I_{ij} \cdot (1 - C_i) \cdot N_{i_{alone}})_{i,j=1}^{n,m} \in R$ – матрица простоя оборудования (в часах), $T_{lim} \in R_+$ – верхний порог суммарного простоя оборудования за один ремонт (в часах), $k_d \in R_+$ – коэффициент дефляции, соответствующий году ремонта, $X = k_d (K \circ I) \cdot (N_{i_p})^T \in R$, $i = \overline{1, n}$ – матрица остаточной стоимости детали, $\circ$ – поэлементное произведение матриц; $P_{hour} \in R_+$ – стоимость часа простоя оборудования.

Далее введем операторы: $W_{ij}[I] = I \circ (1 - \delta_{ki} \delta_{ij})_{k,l=1}^{n,m} + (\delta_{ki} \delta_{lj-1})_{i,j=1}^{n,m}$ – оператор, сдвигающий дату ремонта i -ой детали на предыдущую дату. Область определения оператора W – множество матриц I , для которых $\exists I_{kj-1} = 1, k = \overline{1, n}$ такое, что $N_i \in U_{N_i}, N_k \in U_{N_i}, U_{N_i} \subseteq N$, здесь U – подмножество деталей одного агрегата. Оператор $V_i[C] = (\delta_{ii})_{i=1}^n - C$ – оператор смены режима ремонта для i -ой детали с одиночного на групповой.

Тогда задача оптимизации формирования графика ППР: требуется найти минимум функции суммарной стоимости простоя оборудования и остаточной стоимости деталей

$$F = \sum_{i=1}^n X_i + P_{hour} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m T_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\begin{cases} A_{ij} > N_\Delta \\ \sum_{i=1}^n T_{ij} \leq T_{lim}, \forall j \in [1; m] \end{cases} \quad (2)$$

$$\quad (3)$$

Алгоритм решения задачи. Поставленную задачу (1)-(3) можно отнести к классу комбинаторных задач, подобных “задаче об упаковке в контейнеры” и “задаче о рюкзаке”,

которые могут быть решены аналитически или асимптотически [2, 3]. Ключевое отличие поставленной задачи от упомянутых выше заключается в особенностях качественных критериев, а также изменении характеристик объектов в зависимости от варианта размещения. На данном этапе исследования мы предлагаем следующий алгоритм решения задачи (1)-(3):

1. Сформировать матрицу I : строки соответствуют *деталям* оборудования, а столбцы – *датам* ППР. Замена детали производится в дату ППР с наименьшим по модулю значением остаточного ресурса.
2. Сформировать матрицу A : строки соответствуют деталям оборудования, а столбцы – датам ППР.
3. Если условие (2) не выполнено, то применить операторы W и V для элементов матрицы I . Повторить шаги 2-3. Если условие (2) выполнено, то на шаг 4.
4. Сформировать матрицу T : строки соответствуют *деталям* оборудования, а столбцы – *датам* ППР.
5. Если условие (3) верно, то на шаг 6, иначе применить операторы W и V к матрице I : для столбцов матрицы T найти минимальный элемент в соответствующем столбце матрицы A . Повторить шаги 2-5.
6. Сформировать матрицу X : строки соответствуют деталям оборудования, а столбцы – датам ППР.
7. Вычислить значение целевой функции $F(1)$.
8. Применить оператор W к матрице I : выполнить сдвиг замены i -ой детали на предыдущую дату ППР, если в предыдущем плане есть детали из такого же агрегата, что и i -ая деталь. Если в первоначальном плане режим ремонта был одиночный, то для i -ой детали применить оператор V .
9. Повторить шаги 2-7.
10. Если значение F уменьшилось, то оптимальным решением считается полученная матрица I , в противном случае – исходная матрица I .

Висновок. Предложенный алгоритм имеет сложность $O(n^2m^2)$ и позволяет сформировать график планово-предупредительного ремонта с наименьшей суммой стоимости простоя оборудования и остаточной стоимости заменяемых деталей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баскакова Н.Т., Дорман В.Н. К вопросу эффективности аутсорсинга ремонтных работ на промышленном предприятии // Экономический анализ: теория и практика. – 2017. – Т. 16, вып. 2. – С. 351–363
2. Pereira J. Procedures for the bin packing problem with precedence constraints. European Journal of Operational Research. 2016. – V. 250(3). – P. 794-806.
3. Фуремс Е.М. Обратная задача об упаковке в контейнеры при наличии качественных критериев – постановка и обзор применяемых методов // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2016. № 3. – С. 31–43.