Оптимизация средних времен восстановления тракторов при ремонте отказавших систем

В. Н. Андреев[1]
М. А. Мазуркевич
Санкт-Петербургская лесотехническая академия
Петрозаводский государственный университет

АННОТАЦИЯ

В статье приводится оптимизация средних времен восстановления систем тракторов методом нелинейного программирования. Дается методика оптимизации, приводятся численные значения средних времен простоя в ремонте по основным системам трактора ТБ-1М.

Ключевые слова: *ремонтопригодность, среднее время восстановления, оптимизация, система, техническое обслуживание, отказ, безотказность.*

SUMMARY

This paper contains the optimization of mean restoration time of tractor systems by non-linear programming method. The procedure includes method of optimization, mean restoration time value of tractor TB-1M basis system.

Keywords: *maintainability, mean restoration time, optimization, system, maintenance, failure, reliability.*

При восстановлении свойств системы после каждого отказа возможен следующий вариант стратегии, которую назовем буквой Е.

Стратегия Е. *В начальный момент времени t_0 система является новой. С этого момента система работает случайное время t до первого отказа. При отказе система некоторое время простаивает до обнаружения отказа и выявления причины. В случайный момент времени, после выявления отказа, проводится внеплановый аварийный ремонт отказавшего блока. Введем допущение о том, что при простоях системы и ремонтах отказавших блоков у остальных блоков не ухудшаются характеристики надежности. Такая стратегия рассматривалась ранее в числе возможных стратегий в работах [1,2,3,4].*

Отличительной особенностью данной стратегии, от возможных других, является то, что в ней не планируется техническое обслуживание и оптимизация периодичности его проведения. В этом случае выполняется только численный анализ показателей надежности, в частности, изменения коэффициента готовности – $K_г$ и анализ характера изменения функции плотности вероятности отказов – f(t). Выполненный анализ характера изменения этих показателей показывает, что коэффициент готовности – монотонно убывающая функция типа $y = a\exp(-bt)$, а $f(t)$ – экспоненциальный закон. При таком характере изменения показателей надежности и технико-экономические показатели становятся монотонными и проведение оптимизации в данной стратегии лишается смысла [5].

Однако оптимизационная задача может быть сформулирована по-иному. Поскольку при отказе i-го блока (системы) средние удельные потери за единицу времени при проведении внеплановых ремонтов отказавших блоков будут различными, то может быть поставлена задача *обеспечения в процессе проектирования оптимальных значений средних времен T_i на восстановление i-го блока.* Математически сформулируем задачу следующим образом.

В системе, состоящей из N блоков, найти оптимальные значения средних времен восстановления отказавших блоков T_i^*, обеспечивающих экстремальные значения $C(T_i)$ и $C^{пр}(T_i)$, т.е

$$\left.\begin{aligned} C^\bullet(T_i) &= \min C(T^\bullet) \\ C^{\bullet пр}(T_i) &= \max C^{пр}(T^\bullet) \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Данная задача представляет простейшую задачу нелинейного программирования с ограничениями областного типа и может быть решена аналитически методом Эйлера. При решении данной задачи условно разобьем лесную машину на шесть независимых систем, отказ по любой из них приводит к общему отказу трактора. Обозначим эти подсистемы номерами i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 и соответствующие индексы будут означать: 1 – двигатель, 2 – трансмиссия, 3 – гидросистема, 4 – технологическое оборудование, 5 – ходовая часть и 6 – электрооборудование.

При указанной выше постановке задачи и принятых допущения оптимальные значения T_i^* определятся из условия

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dC^\bullet(T_i)}{dT_i} = 0 \\ &\qquad\qquad\qquad i = 1(1)6 \\ &\frac{dC^{\bullet пр}(T_i)}{dT_i} = 0 \end{aligned}\right\}. \qquad (2)$$

Обе эти задачи могут решаться отдельно. При этом, если оптимальные решения будут существенно отличаться, то компромиссное решение может быть най-

[1] *Авторы – соответственно д. т. н., профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств и д. т. н., профессор, заведующий кафедрой тяговых машин*

дено одним из известных методов принятия решений [6]. Однако анализ показывает, что в данном случае в этом нет необходимости.

Если принять в первоначальном приближении величину времени поиска неисправности $T_п = 0$ (мгновенное обнаружение места и причины отказа), то решение первой задачи простое, так как сама функция имеет монотонный характер и оптимальными будут конструктивные решения, при которых время безотказной работы стремится к бесконечности, а время восстановления – к нулю. Задача может быть решена, если ввести функции, описывающие величину затрат на единицу увеличения наработки и уменьшения времени восстановления. При этом эти функции должны отражать одновременно как уровень производства, так и организацию ремонтных работ.

Такая постановка задачи уже не имеет простейшего решения, и здесь могут быть найдены оптимальные значения T_i^* из следующей функции

$$\overline{C}^{(np)} = \frac{1-\sum_{i=1}^{6}\frac{1}{M_{ti}}(C_i T_i + C_n T_n)}{1+\sum_{i=1}^{6}\frac{T_i + T_n}{M_{ti}}} , \qquad (3)$$

где C_i – потери за единицу времени при проведении аварийного ремонта i -го блока;

T_i – среднее время восстановления i -го блока;

C_n – потери на поиск причин отказа в единицу времени.

Принимая, как и в первом случае, $T_п = 0$, а также, что

$$\left\{1+\sum_{i=1}^{6}\frac{T_i}{M_{ti}}\right\}^2 \neq 0, \qquad (4)$$

и используя условие (2) для определения T_i^*, получим систему линейных неоднородных алгебраических уравнений, которая в векторно-матричной форме будет иметь вид:

$$A_{[6]} \cdot \overline{T}^{\bullet}{}_{[6]} = B_{[6]} , \qquad (5)$$

где $T^{\bullet}{}_{[6]} =< T_1, T_2, ...T_6 >$ – вектор оптимальных значений $T_i^{\bullet}$;

$B_{[6]} =< b_1, b_2, ...b_6 >$ – вектор коэффициентов правых частей уравнений системы.

$$A_{[6]} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ . & . & . & . & . & . \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{vmatrix} -$$

матрица коэффициентов при неизвестных T_i^*.

Особенностью системы (5) является то, что диагональю матрицы $A_{[6]}$ являются нули, т.е. $a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{44} = a_{55} = a_{66} = 0$.

Кроме того, целесообразно будет определение не абсолютных значений $T_i^{\bullet}$, а их относительных значений вида $T_i^{\bullet}/M_{ti} = x_i$. В этом случае появляется возможность управления в процессе проектирования сразу двумя факторами: безотказностью и ремонтопригодностью блоков. Тогда уравнение (5) запишется следующим образом:

$$\overline{A}_{[6]} \cdot X_{[6]}^{\bullet} = B_{[6]} , \qquad (6)$$

где $\overline{A}_{[6]}$ – матрица, составленная из следующих коэффициентов:

$a_{12} = 1 - C_2/C_1$	$a_{21} = 1 - C_1/C_2$,	$a_{31} = 1 - C_1/C_3$
$a_{13} = 1 - C_3/C_1$,	$a_{23} = 1 - C_3/C_2$,	$a_{32} = 1 - C_2/C_3$
$a_{14} = 1 - C_4/C_1$,	$a_{24} = 1 - C_4/C_2$,	$a_{34} = 1 - C_4/C_3$
$a_{15} = 1 - C_5/C_1$,	$a_{25} = 1 - C_5/C_2$,	$a_{35} = 1 - C_5/C_3$
$a_{16} = 1 - C_6/C_1$,	$a_{26} = 1 - C_6/C_2$,	$a_{36} = 1 - C_6/C_3$
$a_{11} = 0$	$a_{22} = 0$	$a_{33} = 0$
$a_{41} = 1 - C_1/C_4$,	$a_{51} = 1 - C_1/C_5$,	$a_{61} = 1 - C_1/C_6$
$a_{42} = 1 - C_2/C_4$,	$a_{52} = 1 - C_2/C_5$,	$a_{62} = 1 - C_2/C_6$
$a_{43} = 1 - C_3/C_4$,	$a_{53} = 1 - C_3/C_5$,	$a_{63} = 1 - C_3/C_6$
$a_{45} = 1 - C_5/C_4$,	$a_{54} = 1 - C_4/C_5$,	$a_{64} = 1 - C_4/C_6$
$a_{46} = 1 - C_6/C_4$,	$a_{56} = 1 - C_6/C_5$,	$a_{65} = 1 - C_5/C_6$
$a_{44} = 0$	$a_{55} = 0$	$a_{66} = 0$
$B_1 = -(1 + 1/C_c)$,	$B_2 = -(1 + 1/C_2)$,	$B_3 = -(1 + 1/C_3)$
$B_4 = -(1 + 1/C_4)$,	$B_5 = -(1 + 1/C_5)$,	$B_6 = -(1 + 1/C_6)$

Корни уравнения (6) дают стационарные значения коэффициентов $x_i^{\bullet}$, которые после проверки знака экстремума с помощью Гессиана $G(X^{\bullet}[n])$ (матрица Гесса) позволяют определить оптимальные значения $x_i^{\bullet}$. Гессиан, как известно, составлен из вторых производных от первоначальной целевой функции (2) и имеет следующий вид:

$$\Delta^2 C^{np}(X_{[6]}) = G(X_{[6]}) = \begin{vmatrix} \frac{d^2C}{dX_1^2} & \frac{d^2C}{dX_1 dX_2} & \cdot\ \cdot & \frac{d^2C}{dX\ X_6} \\ \frac{d^2C}{dX_2 dX_1} & \frac{d^2C}{dX_2^2} & \cdot\ \cdot & \frac{d^2C}{dX_2 dX_6} \\ \vdots & & \cdot\ \cdot & \vdots \\ \frac{d^2C}{dX_6 dX_1} & \frac{d^2C}{dX_6 dX_2} & \cdot\ \cdot & \frac{d^2C}{d^2X_6} \end{vmatrix} \quad (7)$$

Если $G(X_{[6]})$ положительно определена, т.е. $Д\left[G(X_{[6]})\right] > 0$, то в точках $X_i^{\bullet}$ имеет место экстремальное значение функции C^{np}. Поиск оптимальных значений $T_i^{\bullet}$ может быть выполнен и прямым путем с помощью непосредственного вычисления экстремальных значений функций (1). Продифференцируем функцию (3) по T_i (i = 1, 2 ....6) и при $C_n T_n = 0$ и знаменателе $\neq$ 0 будем иметь.

$$\frac{dC^{np}}{dT_1} = -\frac{C_1}{M_{t1}}\left(1+\frac{T_1}{M_{t1}}+\frac{T_2}{M_{t2}}+\frac{T_3}{M_{t3}}+\frac{T_4}{M_{t4}}+\frac{T_5}{M_{t5}}+\frac{T_6}{M_{t6}}\right)-\frac{1}{M_{t1}}\left(1-\frac{C_1T_1}{M_{t1}}-\frac{C_2T_2}{M_{t2}}-\frac{C_3T_3}{M_{t3}}-\frac{C_4T_4}{M_{t4}}-\right.$$
$$\left.-\frac{C_5T_5}{M_{t5}}-\frac{C_6T_6}{M_{t6}}\right)=0.$$

Разделим обе части уравнения на M_{ti} $(M_{ti} \neq 0)$ и на $-C_1$. После преобразования получим

$$1+\frac{T_2}{M_{t2}}+\frac{T_3}{M_{t3}}+\frac{T_4}{M_{t4}}+\frac{T_5}{M_{t5}}+\frac{T_6}{M_{t6}}+\frac{1}{C_1}-\frac{C_2T_2}{C_1M_{t2}}-\frac{C_3T_3}{C_1M_{t3}}-\frac{C_4T_4}{C_1M_{t4}}-\frac{C_5T_5}{C_1M_{t5}}-\frac{C_6T_6}{C_1M_{t6}}=0,$$

$$\frac{T_2}{M_{t2}}\left(1-\frac{C_2}{C_1}\right)+\frac{T_3}{M_{t3}}\left(1-\frac{C_3}{C_1}\right)+\frac{T_4}{M_{t4}}\left(1-\frac{C_4}{C_1}\right)+\frac{T_5}{M_{t5}}\left(1-\frac{C_5}{C_1}\right)+\frac{T_6}{M_{t6}}\left(1-\frac{C_6}{C_1}\right)+\left(1+\frac{1}{C_1}\right)=0,$$

$$\left(1+\frac{1}{C_2}\right)+\frac{T_1}{M_{t1}}\left(1-\frac{C_1}{C_2}\right)+\frac{T_3}{M_{t3}}\left(1-\frac{C_3}{C_2}\right)+\frac{T_4}{M_{t4}}\left(1-\frac{C_4}{C_2}\right)+\frac{T_5}{M_{t5}}\left(1-\frac{C_5}{C_2}\right)+\frac{T_6}{M_{t6}}\left(1-\frac{C_6}{C_2}\right)=0,$$

$$\left(1+\frac{1}{C_3}\right)+\frac{T_1}{M_{t1}}\left(1-\frac{C_1}{C_3}\right)+\frac{T_2}{M_{t2}}\left(1-\frac{C_2}{C_3}\right)+\frac{T_4}{M_{t4}}\left(1-\frac{C_4}{C_3}\right)+\frac{T_5}{M_{t5}}\left(1-\frac{C_5}{C_3}\right)+\frac{T_6}{M_{t6}}\left(1-\frac{C_6}{C_3}\right)=0,$$

$$(1+\frac{1}{C_4})+\frac{T_1}{M_{t1}}(1-\frac{C_1}{C_4})+\frac{T_2}{M_{t2}}(1-\frac{C_2}{C_4})+\frac{T_3}{M_{t3}}(1-\frac{C_3}{C_4})+\frac{T_5}{M_{t5}}(1-\frac{C_5}{C_4})+\frac{T_6}{M_{t6}}(1-\frac{C_6}{C_4})=0,$$

$$(1+\frac{1}{C_5})+\frac{T_1}{M_{t1}}(1-\frac{C_1}{C_5})+\frac{T_2}{M_{t2}}(1-\frac{C_2}{C_5})+\frac{T_3}{M_{t3}}(1-\frac{C_3}{C_5})+\frac{T_4}{M_{t4}}(1-\frac{C_4}{C_5})+\frac{T_6}{M_{t6}}(1-\frac{C_6}{C_5})=0,$$

$$(1+\frac{1}{C_6})+\frac{T_1}{M_{t1}}(1-\frac{C_1}{C_6})+\frac{T_2}{M_{t2}}(1-\frac{C_2}{C_6})+\frac{T_3}{M_{t3}}(1-\frac{C_3}{C_6})+\frac{T_4}{M_{t6}}(1-\frac{C_4}{C_6})+\frac{T_5}{M_{t5}}(1-\frac{C_5}{C_6})=0.$$

Таким образом, получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned}
&a_{11}x_1+a_{12}x_2+a_{13}x_3+a_{14}x_4+a_{15}x_5+a_{16}x_6=b_1,\\
&a_{21}x_1+a_{22}x_2+a_{23}x_3+a_{24}x_4+a_{25}x_5+a_{26}x_6=b_2,\\
&a_{31}x_1+a_{32}x_2+a_{33}x_3+a_{34}x_4+a_{35}x_5+a_{36}x_6=b_3,\\
&a_{41}x_1+a_{42}x_2+a_{43}x_3+a_{44}x_4+a_{45}x_5+a_{46}x_6=b_4,\\
&a_{51}x_1+a_{52}x_2+a_{53}x_3+a_{45}x_4+a_{55}x_5+a_{56}x_6=b_5,\\
&a_{61}x_1+a_{62}x_2+a_{63}x_3+a_{64}x_4+a_{65}x_5+a_{66}x_6=b_6.
\end{aligned} \qquad (8)$$

Выполнив определенные вычисления в пакете MCAD на ПЭВМ, получили следующую систему алгебраических уравнений, у которых модуль значений «x_i» дает оптимальные отношения T_i/M_{ti} :

$$\begin{aligned}
&-3.631x_2-0.433x_3-1.478x_4+0.097x_5+0.194x_6=1,\\
&0.784x_1+0.691x_3+0.465x_4+0.805x_5+0.826x_6=1,\\
&0.302x_1-2.232x_2-0.729x_4+0.370x_5+0.437x_6=1,\\
&0.596x_1-0.869x_2+0.422x_3+0.636x_5+0.675x_6=1,\\
&-0.108x_1-4.130x_2-0.587x_3-1.745x_4+0.107x_6=1,\\
&-0.240x_1-4.743x_2-0.777x_3-2.073x_4-0.119x_5=1.
\end{aligned} \qquad (9)$$

Решение системы линейных уравнений (9) в пакете MCAD позволило найти оптимальные значения «x_i»:

$x_1 = 0.331$; $x_2 = 0.503$; $x_3 = 0.229$; $x_4 = 0.541$; $x_5 = 0.347$; $x_6 = 0.054$.

Проанализируем полученные результаты. Значение «x_i» определяет отношение средних времен простоя i-й системы при устранении отказов к вероятности безотказной работы системы. Следовательно, с улучшением безотказности системы среднее время простоя трактора в ремонте можно увеличивать, и наоборот. Если принять вероятность безотказной работы трактора равной 0.975, то средние оперативные оптимальные времена простоя при устранении отказов, возникающих в системах трактора, будут следующими (табл. 1).

Таблиц

Среднее время простоя при устранении отказов в системах трактора ТБ –1М

Системы трактора	Средние оперативные времена простоя, ч	
	оптимальное	сущест-вующее
Двигатель	0,323	0,3136
Трансмиссия	0,491	1.4491
Ходовая	0.338	0,4486
Техн.оборудован.	0.527	0.7756
Электрооборудов.	0.054	0.2837
Гидросистема	0.223	0.2531

Анализ данных таблицы показывает, что оптималь ные значения средних оперативных времен просто трактора в ремонте при устранении отказов отлича ются от существующих. Наибольшее отличие по сле дующим системам: трансмиссия, технологическо оборудование и электрооборудование. Близко к оп тимальному времени – двигатель, ходовая и гидро система.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герцбах И. Б. Модели профилактики (теоретиче ские основы профилактических работ). М.: Сов радио, 1964. 315 с.
2. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Некоторы математические вопросы теории обслуживани сложных систем. М.: Сов. радио, 1971. 270 с.
3. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслу живания сложных систем. М.: Высшая школа 1982. 228 с.
4. Астахов С. В. и др. Оценка надежности судовы механизмов при проектировании и эксплуата ции. Л.: Судостроение, 1984. 190 с.
5. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теори надежности и испытания на безотказность : Пер с англ. М.: Машиностроение, 1978. 590 с.
6. Кофман А. Методы и модели исследования опе раций / Под ред. Д. В. Юдина. М.: Мир, 1966 523 с.