

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АГРЕГАТОВ ТРАНСМИССИИ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приймаков О.Г., к.т.н., Циба Н.В., аспирант, Чернявский В.Н., к.т.н.
(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. П. Василенко)

Предложена математическая модель оценки остаточного ресурса агрегатов трансмиссии сельскохозяйственной техники с применением адаптивного фильтра Калмана. Модель позволяет найти оценку остаточного ресурса, а также вероятность безотказной работы в эксплуатации.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими программами. Обеспечение заданных значений показателя технической готовности в условиях снижения затрат на закупку запасных частей и материалов является важной задачей, выполнение которой возможно, только при внедрении новых, перспективных технологий контроля технического состояния, что позволит предупредить возникновение отказов. Выполненный анализ работ посвященных диагностированию технического состояния и прогнозированию остаточного ресурса позволил установить, что наиболее приемлемым методом для этой цели является метод эмиссионного спектрального анализа (ЭСА). Данный метод хорошо зарекомендовал себя и нашел широкое применение при контроле состояния тягового подвижного состава железнодорожного транспорта, а также газотурбинных двигателей самолетов гражданской авиации [1 - 4]. Это позволило при контроле технического состояния агрегатов выявлять до 94% неисправностей, с точностью диагностирования 85% [2].

Проведенный анализ публикации показывает, что фильтр Калмана исследователями применялся для решения разнообразных задач. Так в работе [4] он был применен для исследования процесса функционирования интегрального показателя работоспособности авиационных материалов, в работе [5] для процесса системного подбора и определения терминов эксплуатации моторных масел, в работе [6] для решения задач прогнозирования реализаций случайных процессов.

Следует отметить, что только математическая логистика позволяет объективно научно-обоснованно решить задачи многофакторного влияния на конечный результат величин, что имеют разную физическую природу, размерность, продолжительность и рейтинг влияния в условиях полной или частичной неопределенности.

Цель статьи. Разработка математической модели определения остаточного ресурса агрегатов трансмиссии сельскохозяйственной техники (АСТ) на основе адаптивного фильтра Калмана.

Основные положения материала статьи. Фильтр Калмана позволяет провести рекурсивное дооценивание вектора состояния априорно известной динамической системы. Для расчета текущего состояния системы необходимо знать текущее изменение, а также предыдущее состояние самого фильтра. Вся информация, что поступает, используется для корректирования рекурсивной оценки, то есть фильтр имеет обратную связь с выходными параметрами и является адаптивным [5, 7].

Анализ факторов влияющих на техническое состояние АСТ в процессе эксплуатации позволил установить, что определяющими, являются:

- время эксплуатации;
- напряженность в работе или степень загрузки техники в процессе эксплуатации;
- начальные трибологические свойства применяемых трансмиссионных масел;
- предельно-допустимые трибологические свойства трансмиссионных масел, при достижении которых проводят замену смазочных материалов;
- степень запыленности воздуха при выполнении полевых работ.

Для дальнейших исследований перечисленные факторы представим в виде безразмерных величин, и будем их использовать как входные параметры при моделировании изменения технического состояния АСТ.

Безразмерную величину, учитывающую время эксплуатации, можно выразить как отношения показания счетчика моточасов $t_{м.ч}$, к времени эксплуатации $t_{экспл}$:

$$T = \frac{t_{м.ч}}{t_{экспл}}. \quad (1)$$

При интенсивной эксплуатации АСТ, например, пахота, дискование, $T > 1$, а при выполнении транспортных работ $T \leq 1$.

Напряженность в работе или степень загрузки техники в процессе эксплуатации можно выразить как отношение среднестатистического часового расхода топлива машинно-тракторным агрегатом (МТА) $G_{ч, экспл}$ среднестатистическому часовому расходу топлива данным энергетическим средством при выполнении транспортных работ $G_{ч, ттранс}$:

$$G_{э} = \frac{G_{ч, экспл}}{G_{ч, ттранс}}. \quad (2)$$

Начальные трибологические свойства применяемых трансмиссионных масел можно определить по формуле [8, 9]:

$$\pi_{м0} = \frac{\nu^{0,5} E_y \tau}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где ν – кинематическая вязкость масла при 100 °С;

E_y – энергетический интегральный критерий оценки смазывающих свойств;

τ - противопиттинговая способность масла;

ε - наличие в масле механических примесей.

Предельно допустимые трибологические свойства применяемых масел, при достижении которых производят замену, определяют по формуле (3), где в качестве начальных параметров используют их предельные значения:

$$\pi_{mпред} = \frac{v_{пред}^{0,5} E_{y.пред} \tau_{пред}}{\varepsilon_{пред}}. \quad (4)$$

Степень запыленности воздуха при выполнении полевых работ МТА можно оценить как отношение концентрации пыли при выполнении полевых работ C_p , к концентрации пыли при выполнении транспортных работ C_m :

$$C = \frac{C_p}{C_m}. \quad (5)$$

Установлено [10], что величины концентрации пыли на один м³ воздуха при выполнении различных видов сельскохозяйственных работ имеют значения представленные в табл. 1:

Таблица 1. Концентрация пыли в воздушной среде при выполнении сельскохозяйственных работ

Вид работ	Концентрация пыли, г/м ³
Лушение	2,12
Пахота	2,075
Уборка зерновых	2,01
Транспортные работы	1,78

Обобщенная структурная схема рекурсивного устройства оценки $\hat{x}(n)$ первого порядка показана на рис. 1

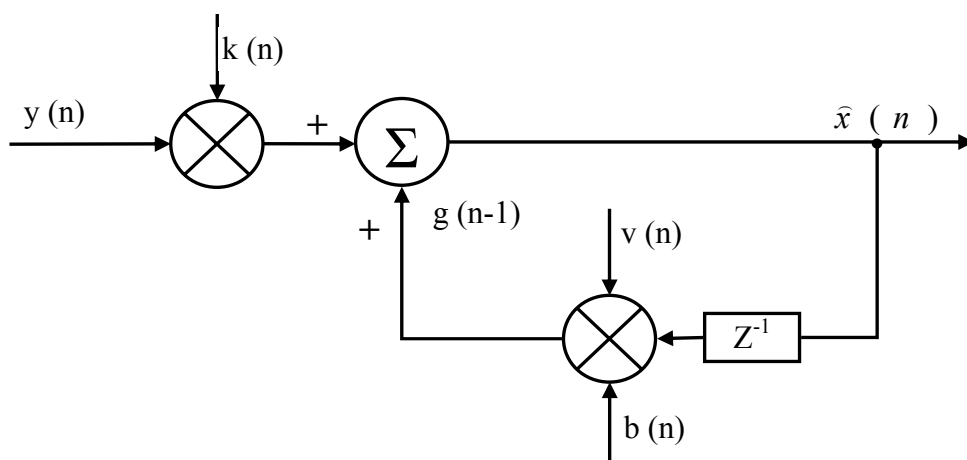


Рис.1. Общая структура схемы рекурсивного скалярного устройства оценки исходящего сигнала

На рис.1 напряженность работы G_y обозначено параметром $y(n)$; время эксплуатации T обозначено параметрам $k(n)$; Σ – сектор суммирования аддитивных сигналов (G_y+T); $b(n)$ - обозначает свойство масла и особенности эксплуатации АСТ (π_{m0}, π_{mnpred}) начальные и гранично-допустимые трибологические свойства масел, степень запыленности C); $v(n)$ – белый шум; n – количество выполненных контролей технического состояния.

Модель измерения являет собой усиливающую цепь "с" и источник аддитивного белого шума $v(n)$. Принявши эту модель генерации сигнала, выборку сигнала, что поступал с номером, можно определить так:

$$y(n) = cx(n) + v(n). \quad (6)$$

Рекурсивная формула оценки первого порядка $\hat{x}(n)$ имеет вид:

$$\hat{x}(n) = b(n)\hat{x}(n-1) + k(n)y(n). \quad (7)$$

Отклик $\hat{x}(n)$, как целевой функции процесса, должен минимизироваться, то есть $\hat{x}(n) \Rightarrow \min$. Ради получения оптимального, с точки зрения наименьших квадратов устройства, оценки $\hat{x}(n)$ и среднеквадратическая ошибка $\delta(n)$ может дифференцироваться по $b(n)$ и $k(n)$, а результаты приравняются нулю:

$$p(n) = E[\hat{x}(n) - x(n)]^2 = E[b(n)\hat{x}(n-1) + k(n)y(n) - x(n)]^2, \quad (8)$$

$$\frac{\partial p(n)}{\partial b(n)} = 2E\{[b(n)\hat{x}(n-1) + k(n)y(n) - x(n)]\hat{x}(n-1)\} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial p(n)}{\partial k(n)} = 2E\{[b(n)\hat{x}(n-1) + k(n)y(n) - x(n)]y(n)\} = 0. \quad (10)$$

Соотношение между $b(n)$ и $k(n)$ можно вывести с (9):

$$2E\{[b(n)\hat{x}(n-1) + k(n)y(n) - x(n)]\hat{x}(n-1)\} = 0$$

$$\Rightarrow E\{[b(n)\hat{x}(n-1)]\hat{x}(n-1)\} \quad (11)$$

$$= E\{[k(n)y(n) - x(n)]\hat{x}(n-1)\}$$

$$\Rightarrow E\{b(n)[\hat{x}(n-1) - x(n-1)] + b(n)x(n-1)\hat{x}(n-1)\} =$$

$$= E\{[x(n) - k(n)y(n)]\hat{x}(n-1)\}. \quad (12)$$

Подставляя значения $y(n)$ из (6), находим:

$$b(n)E\{c(n-1)\hat{x}(n-1) + x(n-1)\hat{x}(n-1)\} = E\{[x(n)[1 - ck(n)] - k(n)v(n)]\hat{x}(n-1)\}. \quad (13)$$

Для оптимального устройства оценки $\hat{x}(n)$ должен исполняться принцип ортогональности, который позволяет получить:

$$E[c(n)\hat{x}(n-1)] = 0; E[v(n)\hat{x}(n-1)] = 0.$$

Тогда уравнение (13) примет вид:

$$b(n)E[x(n-1)\hat{x}(n-1)] = [1 - ck(n)]E[x(n)\hat{x}(n-1)]. \quad (14)$$

С модели генерации имеем:

$$x(n) = ax(n-1) = g(n-1). \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14), получаем:

$$b(n)E[x(n-1)\hat{x}(n-1)] = [1 - ck(n)]E[ax(n-1)\hat{x}(n-1) = g(n-1)\hat{x}(n-1)]. \quad (16)$$

С уравнения (6) и (7) находим:

$$\hat{x}(n) = b(n)\hat{x}(n-1) + k(n)cx(n) + k(n)v(n), \quad (17)$$

выполнив подстановку $x(n)$ из (15) получаем:

$$\begin{cases} \hat{x} = b(n)\hat{x}(n-1) + k(n)acx(n-1) + k(n)cg(n-1) + k(n)v(n) \\ \hat{x}(n-1) = b(n-1)\hat{x}(n-2) + ack(n-1)x(n-2) + ck(n-1)g(n-2) + k(n-1)v(n-1). \end{cases} \quad (18)$$

Так как среднее всех произведений членов (18) на $g(n-1)$ равно 0, можем записать:

$$E\{\hat{x}(n-1)g(n-1)\} = 0.$$

Воспользовавшись этим, можем записать для (16):

$$b(n)E[x(n-1)\hat{x}(n-1)] = a[1 - ck(n)]E[x(n-1)\hat{x}(n-1)]. \quad (19)$$

Это приводит к конечному соотношению между $b(n)$ и $k(n)$:

$$b(n) = a[1 - ck(n)]. \quad (20)$$

Подставляя (20) в (7) находим:

$$\hat{x}(n) = a\hat{x}(n-1) + k(n)[y(n) - ac\hat{x}(n-1)]. \quad (21)$$

Уравнение (21) представляет модель оптимального рекурсивного устройства оценки первого порядка или скалярного фильтра Калмана. Первый член $a\hat{x}(n-1)$ прогнозирует текущую выборку, а второй член корректирует ее на основании обратной связи.

Среднеквадратическая ошибка, с учетом (21), будет иметь вид:

$$p(n) = E\{a\hat{x}(n-1) + k(n)[y(n) - acx(n-1)] - x(n)\}^2, \quad (22)$$

Или

$$p(n) = \frac{1}{c} \sigma_v^2 k(n) \quad (23)$$

где σ_v^2 - дисперсия скалярного шума.

Уравнение (20), (21) и (23) есть рекурсивным уравнением, необходимым для реализации фильтра Калмана первого порядка.

Усиление фильтра Калмана должно быть выражено итерационным соотношением. Для рассматриваемого случая примем $a = c = 1$, ввиду того, что мы выполняем попытку по воспроизведению и прогнозированию реального процесса функционирования G_y и всей системы в целом.

В связи с этим формула (21) примет вид:

$$\hat{x}(n) = \hat{x}(n-1) + k(n)[y(n) - \hat{x}(n-1)]. \quad (24)$$

Значения предварительной оценки $\hat{x}(n-1)$ можно взять из статистической базы данных предыдущего периода.

Контроль технического состояния проводится с определенной периодичностью, при известном ее значении можно соответственно определить связь параметра $b(n)$ со временем. Используя результаты [7, 11], можно

утверждать, что $b(n)$ и время t_N необходимое для обеспечения долговечность, связаны зависимостью:

$$b(n) = \sqrt{\frac{t_N}{\Omega}}, \quad (25)$$

где Ω - коэффициент пропорциональности

Максимизируя значение долговечность АСТ $t_N \xrightarrow{b(n)} \max$ при условии $b(n) \geq 0$ методом неопределенных множителей Лагранжа (при равенности фактической и заданной P_3 вероятности безотказной работы МТА), получим равенство:

$$\tilde{b}(n) = 1 + \frac{1}{t_N} \ln[-2(P_3 - 1)], \quad (26)$$

где $\tilde{b}(n)$ – оптимальное значение параметра технологического состояния АСТ. Согласно [12] значение вероятности безотказной работы $P_3 = 0,8$.

Модель может использоваться как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации для прогнозирования надежности и ее показателя остаточного ресурса, как отдельного элемента, так и изделия в целом. Параметр $b(n)$ в математической модели процесса ЭСА можно определить в виде регрессионного уравнения вида:

$$b(n) = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_n x_n \quad (27)$$

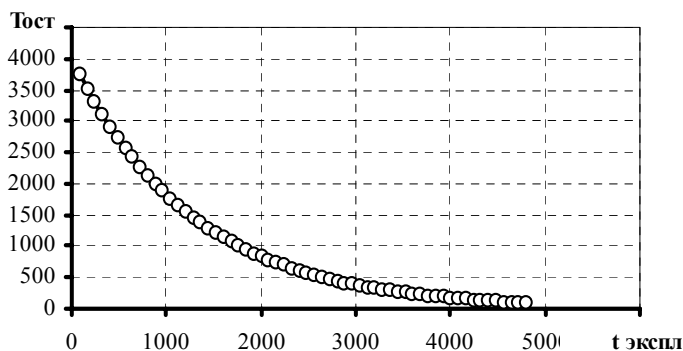
где: x_1, x_2, \dots, x_n - факторы ($\pi_{MO}, \pi_{Mпред}, C$);

a_1, a_2, \dots, a_n - весовые коэффициенты.

Построение математической модели (27) может быть выполнено при использовании регрессионного анализа.

Используя стандартную программу аппроксимации графических зависимостей MathCad для зависимости $\hat{x}(n) = G_y + T = f(n)$ - см. рис. 2 получим следующую интерполяционную формулу:

$$\hat{x}(n) = G_y + T = 4000 \exp(-0,0125n). \quad (28)$$



На рис.2 представлена теоретическая зависимость изменения остаточного ресурса от времени эксплуатации.

Подставив в выражение (24) значения $k(n) = T$, $y(n) = G_y$, $\hat{x}(n) = T + G_y$ и выполнив соответствующие алгебраические преобразования, получим:

$$(n-1)(T + G_y - T^2 - TG_y) = 4000 \exp(-0,0125n), \quad (29)$$

Реализация разработанной математической модели при проведении моделирования процесса изменения технического состояния агрегатов технических систем позволяет получить оценку остаточного ресурса АСТ и вероятность безотказной работы в эксплуатации.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. На основании проведенного анализа применения математического аппарата для решения многофакторных задач установлено, что математическое моделирование процесса оценки остаточного ресурса АСТ предпочтительно (целесообразно) выполнять с применением рекурсивных адаптивных фильтров Калмана с обратной связью.

2. Представленная в работе математическая модель, выполненная на основе применения фильтра Калмана, позволяет найти оценку остаточного ресурса АСТ, а также вероятность ее безотказной работы в эксплуатации.

3. Полученные научные результаты с применением разработанной математической модели позволяют в эксплуатации спрогнозировать моменты выполнения профилактических работ, а также снятия агрегата с эксплуатации по причине снижения показателей надежности.

Список литературы

1. Рекомендации по внедрению диагностической системы управления состоянием дизелей тепловозов и дизель-тепловозов по результатам анализа масла. Введены 23.10.2009г. – 32с.

2. Сиротин Н.Н. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Н.Н. Сиротин, Ю.М. Коровкин. – М.: Машиностроение, 1979. – 279с.

3. Калашников С.И. Применение феррографического и ренгеноспектрального методов для диагностики технического состояния авиационных турбохолодильников по содержанию частиц износа в смазочном масле / С.И. Калашников, В.А. Степанов, В.С. Угрюмов // М.: тр. ЦИАМ, №1159. – 1986. – 58с.

4. Васильев В.И. Моделирование систем гражданской в авиации / В.И. Васильев, А.И. Иванюк. – М.: Транспорт, 1977. – 362с.

5. Приймаков О.Г. Математичне моделювання процесу системного підбору та визначення термінів експлуатації моторних олиф / О.Г. Приймаков, В.А. Мазепа // Проблеми трибології «Problems of Tribology». – 2006. – №3. – С.13-19.

6. Гридина Е.Г. Модифицированный фильтр Калмана / Е.Г. Гридина, А.Н. Лебедев, Д.Д. Недосекин // Измерительная техника. – 1996, №5. – С. 13-15.

7. Приймаков О.Г. Прогнозування витривалості та загальної працездатності несучих елементів авіаційних конструкцій / О.Г. Приймаков, Ю.О. Градиський, Г.О. Приймаков. Монографія. – Х.: Оберіг, 2010. – 247 с.

8. Войтов В.А. Системный подход в выборе трансмиссионных масел к механическим агрегатам трансмиссии / В.А. Войтов, С.А. Митиков // Автомобильный транспорт: сб. науч. тр. ХНАДУ. Х.: ХНАДУ, 2007. – № 20. – С. 19-21.

9. Войтов В.А. Интегральный критерий оценки трибологических свойств смазочных материалов на четырехшариковой машине / В.А. Войтов, А.В. Левченко // Трение и износ. – 2001. – т. 22, № 4. – С. 441-447.

10. Дідур В.А. Вплив забрудненості дизельного палива на ефективність використання машинно-тракторних агрегатів / В.А. Дідур, В.В. Дідур, І.Б.Вороновський // Праці ТДАТА. – 2005. – вип.. 33. – С. 3-13

11. Расчет на прочность деталей машин. Справочник / под ред. Биргер И.А. Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.

12. Кухтов В.Г. Долговечность деталей шасси колесных тракторов. – Харьков: ХНАДУ, 2004. – 291 с.

Анотація

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ АГРЕГАТИВ ТРАНСМІСІЇ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Приймаков О.Г., Циба М.В., Чернявський В.М.

Запропоновано математичну модель оцінки залишкового ресурсу агрегатів трансмісії сільськогосподарської техніки з застосуванням адаптивного фільтра Калмана. Модель дозволяє знайти оцінку залишкового ресурсу, а також імовірність безвідмовної роботи в експлуатації.

Abstract

MATHEMATICAL MODEL OF RESIDUAL LIFE ASSESSMENT OF TRANSMISSION UNITS IN SERVICE

O. Priymakov, N. Tsiba, V. Chernyavsky

A mathematical model of the residual life assessment of transmission units of agricultural machinery using adaptive Kalman filter is proposed. The model allows to find an estimate of residual life, as well as the probability of failure-free operation in service.