

ПОТЕРИ УРОЖАЯ ПРИ КОРРЕКТИРУЮЩЕМ РЕМОНТЕ МАШИНЫ И ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ПО СОСТОЯНИЮ ПЕРЕД ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИЕЙ

Сергей Шевченко

*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
имени Петра Василенка
Проспект Московский 45, Харьков, Украина. E-mail: Serg.Shevchen@gmail.com*

Sergey Shevchenko

*Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko
St. Artem 44, Kharkiv, Ukraina. E-mail: Serg.Shevchen@gmail.com*

Аннотация. Отказы машин растениеводства приводят к несвоевременному выполнению технологических операций и потери части урожая. Поскольку эти потери являются случайными, при планировании производственной деятельности целесообразно осуществлять вероятностный анализ рисков.

Рассмотрен случай, когда технологическая операция выполняется одной машиной, а зависимость потерь урожая от времени выполнения операции является линейной. Определены математическое ожидание и коэффициент вариации потерь урожая при корректирующих ремонтах машины после отказов (при этом параметр потока отказов является постоянным). При этом учтено, что чем большая площадь поля обработана до отказа, тем меньшими являются потери. Эти результаты далее используются для сравнения корректирующего ремонта и обслуживания по техническому состоянию.

Обслуживание по техническому состоянию позволяет уменьшить поток отказов и соответствующие потери урожая. В данной работе проанализировано влияние диагностирования и превентивных замен агрегатов перед технологической операцией на потери урожая.

Параметр потока отказов уменьшается после превентивных замен агрегатов, а в дальнейшем асимптотически увеличивается до исходного значения. Для аппроксимации такого изменения используется кусочно-линейная функция времени. Параметрами этой функции является коэффициент уменьшения параметра потока отказов непосредственно после превентивных замен и скорость увеличения потока отказов. Эти параметры являются показателями качества обслуживания.

В статье приведены зависимости математического ожидания потерь урожая и коэффициента вариации этих потерь от изменения параметра потока отказов во времени. В частности, рассмотрен случай, когда продолжительность восстановления распределена по экспоненциальному закону.

Полученные результаты могут использоваться при определении надежности технологических систем растениеводства и оптимизации обслуживания машин по состоянию.

Ключевые слова: потери урожая, отказ, издежка, несвоевременность, корректирующий ремонт, обслуживание по состоянию.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Отказы сельскохозяйственных машин и тракторов приводят к несвоевременному выполнению технологических операций растениеводства и потери части урожая [1-3]. В связи с этим проводятся исследования, направленные на определение фактической эксплуатационной надежности [4-5] и ее повышение с учетом вариации условий работы [5-6].

Одним из способов повышения эксплуатационной надежности машин является обслуживание по техническому состоянию [7]. Это позволяет предотвратить, по крайней мере, часть отказов и уменьшить потери урожая. Однако обслуживание по техническому состоянию требует определенных дополнительных затрат на диагностирование машин и приводит к неполному использованию ресурса узлов и агрегатов, которые заменяют по результатам диагностирования.

Таким образом, возникает задача оптимизации обслуживания машин с учетом возможности предотвращения части отказов и соответствующих производственных затрат.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Поскольку возникновение отказов тракторов и сельскохозяйственных машин является случайным процессом [8-10], то и последствия отказов (в частности, потери урожая) характеризуются случайными величинами.

Потери в результате отказов машин при выполнении технологических операций имеют постоянную и случайную составляющую. Постоянная составляющая потерь характеризуется коэффициентом технического использования машин (учитывает потери времени на восстановление машин после отказов и техническое обслуживание). Случайные составляющие потерь на отдельных операциях влияют на вероятность выполнения технологического процесса с заданным качеством [11] и являются одним из факторов риска в деятельности аграрных предприятий [12-13]. Это приводит к необходимости ее вероятно-

стного анализа потерь урожая с целью обоснованного выбора мероприятий по управлению соответствующими рисками [14-18].

Обобщенным показателем качества выполнения технологической операции является коэффициент реализации биологического потенциала растений (КРБП) [1]. При анализе влияния времени выполнения технологической операции на урожайность используют ее линейную зависимость от времени [19-21]. Особенностью растениеводства как производственного процесса является зависимость потерь и от длительности восстановления, и от момента возникновения отказа (доли площади поля, обработанной до отказа) [22].

Численные характеристики потерь урожая вследствие отказов можно определяют методом имитационного моделирования [23-24] и аналитически. В [11] приведены аналитические зависимости для определения математического ожидания и коэффициента вариации потерь для случая, когда при выполнении технологической операции возникает не более одного отказа. Неисследованной частью проблемы является влияние обслуживания по состоянию на численные характеристики потерь урожая вследствие отказов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является сравнение численных характеристик потерь урожая вследствие отказов машины при выполнении технологической операции растениеводства при корректирующем ремонте и обслуживании по техническому состоянию, а также определение влияния качества обслуживания на уменьшение этих потерь.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить численные характеристики потерь урожая вследствие отказов при корректирующем ремонте машины;

- определить зависимость численных характеристик потерь урожая при обслуживании машины по техническому состоянию от качества обслуживания;

- сравнить численные характеристики потерь урожая при корректирующем ремонте и обслуживании по техническому состоянию.

Исследование осуществляется, исходя из следующих предположений:

- технологическая операция выполняется одной машиной;

- параметр потока отказов является постоянным;

- количество возникающих отказов - произвольное;

- длительность восстановления машины после любого их отказов распределена по одному и тому же закону;

- зависимость КРБП растений от времени является линейной ниспадающей:

$$k(t) = 1 - k_1 t, \quad (1)$$

где: k – коэффициент реализации биологического потенциала растений; t – время, с; k_1 – коэффициент пропорциональности в линейной зависимости КРБП растений от времени.

Определим средний КРБП растений при выполнении технологической операции при отсутствии отказов:

$$K_0 = \frac{1}{T} \int_0^T k(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T (1 - k_1 t) dt = 1 - \frac{k_1 T}{2}, \quad (2)$$

где: K_0 – средний КРБП растений при отсутствии отказов.

Потери вследствие нескольких отказов определим методом математической индукции. Допустим, при выполнении технологической операции произошел один отказ, что привело к приостановке работ на время восстановления машины. Определим средний КРБП растений при выполнении технологической операции:

$$K_1 = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\varphi_1 T} (1 - k_1 t) dt + \int_{\varphi_1 T + \tau_1}^{T + \tau_1} (1 - k_1 t) dt \right) = 1 - \frac{k_1 T}{2} - k_1 \tau_1 (1 - \varphi_1), \quad (3)$$

где: K_1 – средний КРБП растений при условии, что при выполнении технологической операции произошел ровно один отказ; T – продолжительность технологической операции, с; φ_1 – доля площади поля, обработанная до наступления первого отказа; τ_1 – продолжительность первого восстановления, с.

Определим потерю КРБП растений вследствие единственного отказа:

$$\Delta k(1) = K_1 - K_0 = k_1 \tau_1 (1 - \varphi_1), \quad (4)$$

где: Δk – потеря среднего КРБП растений вследствие отказов.

Допустим, при выполнении технологической операции произошло m отказов. Определим средний КРБП растений при выполнении технологической операции:

$$K_m = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\varphi_1 T} (1 - k_1 t) dt + \int_{\varphi_1 T + \tau_1}^{T + \tau_1} (1 - k_1 t) dt + \dots + \int_{\varphi_m T + \tau_1 + \dots + \tau_m}^{T + \tau_1 + \dots + \tau_m} (1 - k_1 t) dt \right). \quad (5)$$

Определим влияние $(m + 1)$ -го отказа на потерю среднего КРБП:

$$K_m - K_{m+1} = \frac{1}{T} \left(\int_{\varphi_{m+1} T + \tau_1 + \dots + \tau_m}^{T + \tau_1 + \dots + \tau_m} (1 - k_1 t) dt - \int_{\varphi_{m+1} T + \tau_1 + \dots + \tau_{m+1}}^{T + \tau_1 + \dots + \tau_{m+1}} (1 - k_1 t) dt \right). \quad (6)$$

Упрощая (6), получим:

$$K_{m+1} = K_m + k_1 \tau_{m+1} (1 - \varphi_{m+1}). \quad (7)$$

Используя (4) и соотношение (7), получим формулу для вычисления потери КРБП растений вследствие произвольного количества отказов:

$$\Delta k(M) = k_1 \sum_{m=1}^M (\tau_m (1 - \varphi_m)). \quad (8)$$

Для упрощения дальнейших расчетов, введем случайную величину:

$$\omega = 1 - \varphi, \quad (9)$$

где: ω – доля площади поля, которая оставалась необработанной при возникновении отказа.

Следовательно:

$$\Delta\kappa(M) = k_1 \sum_{m=1}^M \tau_m \omega_m. \quad (10)$$

Определять численные характеристики потерь КПБП вследствие M отказов. Определим математическое ожидание потери КПБП растений:

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa(M)] = k_1 M \mathbf{M}[\tau \omega]. \quad (11)$$

Рассматривая продолжительность восстановления и момент возникновения отказа как независимые случайные величины, получим:

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa(M)] = k_1 M \mathbf{M}[\tau] \mathbf{M}[\omega]. \quad (12)$$

Определим второй начальный момент потери КПБП растений:

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa(M)^2] = k_1^2 \mathbf{M} \left[\sum_{\substack{i=1..M \\ j=1..M}} (\tau_i \omega_i) (\tau_j \omega_j) \right]. \quad (13)$$

Определим общее количество элементов суммы (13):

$$A(M) = M^2, \quad (14)$$

где: A – общее количество элементов.

Определим общее количество элементов вида $(\tau_i \omega_i)^2$ в (13):

$$A_1(M) = M, \quad (15)$$

где: A_1 – общее количество элементов вида $(\tau_i \omega_i)^2$.

Определим общее количество компонентов вида $(\tau_i \omega_i)(\tau_j \omega_j)$, $i \neq j$ в (13):

$$A_2(M) = A(M) - A_1(M) = M^2 - M, \quad (16)$$

где: A_2 – общее количество элементов вида $(\tau_i \omega_i)(\tau_j \omega_j)$, $i \neq j$.

Следовательно:

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}[\Delta\kappa(M)^2] = \\ & = k_1^2 (M \mathbf{M}[\tau^2] \mathbf{M}[\omega^2] + (M^2 - M) \mathbf{M}[\tau]^2 \mathbf{M}[\omega]^2). \end{aligned} \quad (17)$$

Определим дисперсию потерь:

$$\mathbf{D}[\Delta\kappa(M)] = k_1^2 (M \mathbf{M}[\tau^2] \mathbf{M}[\omega^2] - M \mathbf{M}[\tau]^2 \mathbf{M}[\omega]^2). \quad (18)$$

Определим коэффициент вариации потерь:

$$v^2 = \frac{1}{M} (v_\tau^2 + 1)(v_\omega^2 + 1) - \frac{1}{M}. \quad (19)$$

Определим плотность вероятности доли площади поля, которая оставалась необработанной при возникновении отказа:

$$f_\omega(\omega) = f_\varphi(1 - \omega), \quad (20)$$

где: f_ω – плотность вероятности доли площади поля, которая оставалась необработанной при возникновении отказа; f_φ – плотность вероятности доли площади поля, обработанной в возникновении отказа.

При равномерном распределении отказов на интервале выполнения технологической операции, $f_\varphi = 1$ на интервале $\varphi = [0, 1]$. Следовательно, $f_\omega = 1$ на интервале $\omega = [0, 1]$.

Исходя из свойств равномерного распределения:

$$\mathbf{M}[\omega] = \frac{1}{2}, \quad (21)$$

$$\sqrt{\mathbf{D}[\omega]} = \frac{1}{2\sqrt{3}}. \quad (22)$$

Следовательно:

$$v_\omega^2 = \frac{\mathbf{D}[\omega]}{(\mathbf{M}[\omega])^2} = \frac{1}{3}, \quad (23)$$

$$v = \sqrt{\frac{4}{3M} v_\tau^2 + \frac{1}{3M}}. \quad (24)$$

Таким образом, определены численные характеристики потери КРБП растений при условии, что при выполнении технологической операции произошло определенное количество отказов. Однако, при выполнении технологической операции может возникнуть произвольное количество отказов. Рассматривая потерю КРБП растений как вероятностную смесь, определим среднюю потерю КРБП растений с учетом вероятности возникновения определенного количества отказов получим:

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa] = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \mathbf{M}[\Delta\kappa(n)], \quad (25)$$

где: n – количество отказов; p_n – вероятность возникновения ровно n отказов при выполнении технологической операции.

Следовательно:

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa] = k_1 \mathbf{M}[\omega] \mathbf{M}[\tau] \sum_{n=1}^{\infty} p_n n. \quad (26)$$

Вероятность возникновения определенного количества отказов в течение заданного промежутка времени определяется по закону Пуассона:

$$p_n = \frac{(w_0 T)^n}{n!} e^{-w_0 T}. \quad (27)$$

Следовательно:

$$\sum_{n=1}^{\infty} p_n n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(w_0 T)^n}{n!} e^{-w_0 T} n = w_0 T, \quad (28)$$

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa] = k_1 \mathbf{M}[\omega] \mathbf{M}[\tau] w_0 T. \quad (29)$$

Аналогично определим второй начальный момент потерь КРБП растений:

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa^2] = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \mathbf{M}[\Delta\kappa(n)^2], \quad (30)$$

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa^2] = w_0 T k_1^2 \mathbf{M}[\tau^2] \mathbf{M}[\omega^2] + (w_0 T)^2 k_1^2 \mathbf{M}[\tau]^2 \mathbf{M}[\omega]^2. \quad (31)$$

Определим дисперсию потерь КРБП растений:

$$\mathbf{D}[\Delta\kappa] = w_0 T k_1^2 \mathbf{M}[\tau^2] \mathbf{M}[\omega^2]. \quad (32)$$

Определим коэффициент вариации потерь КРБП растений:

$$v = \sqrt{\frac{1}{w_0 T} \cdot (v_\tau^2 + 1) \cdot (v_\omega^2 + 1)}. \quad (33)$$

При корректирующем ремонте отказы равно-

мерно распределены на интервале выполнения технологической операции. Тогда:

$$M[\omega] = 1/2. \tag{34}$$

Следовательно:

$$M[\Delta\kappa] = \frac{k_1 M[\tau] w_0 T}{2}. \tag{35}$$

Определим коэффициент вариации части площади поля, которая осталась необработанной на момент отказа, и коэффициент вариации потерь урожая:

$$v_\omega^2 = \frac{D[\omega]}{(M[\omega])^2} = \frac{1}{3}, \tag{36}$$

$$v = \sqrt{\frac{4}{3w_0 T} \cdot (v_\tau^2 + 1)}. \tag{37}$$

График зависимости (37) показан на рис. 1.

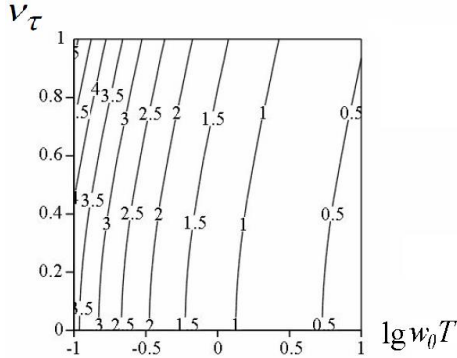


Рис. 1. Зависимость коэффициента вариации потерь урожая от вариации длительности восстановления машины, параметра потока отказов и продолжительности технологической операции

Fig. 1. Dependence of the coefficient of variation of the crop losses from coefficient of variation of recovery duration, failure intensity and duration of technological operation

При экспоненциальном распределении продолжительности восстановления

$$v = \sqrt{\frac{8}{3w_0 T}}. \tag{38}$$

Будем полагать, что перед выполнением технологической операции осуществляется диагностирование и замена потенциально ненадежных элементов (элементов с недостаточным остаточным ресурсом). После таких замен параметр потока отказов уменьшится, а затем будет асимптотически увеличиваться до исходного уровня.

Получим зависимости для численных характеристик потерь при использовании кусочно-линейных аппроксимаций увеличения параметра потока отказов во времени. При этом ограничимся одним интервалом увеличения этой интенсивности (на остальных интервалах полагаем ее постоянной).

Зависимость параметра потока отказов от времени показана на рис 2. Начало отсчета времени соответствует началу работы машины после диагностирования и превентивных замен.

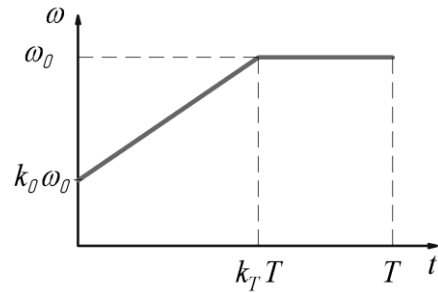


Рис. 2. Зависимость параметра потока отказов от времени (вариант 1).

Fig. 2. Dependence of the failure intensity from time (variant 1).

Результат обслуживания будем характеризовать такими параметрами:

- начальный коэффициент уменьшения параметра потока отказов (характеризует остаточную долю потока отказов, имеющую место непосредственно после диагностирования и замен);

- интервал времени, в течение которого параметр потока отказов восстанавливается до исходного значения (характеризуется относительной величиной - долей продолжительности технологической операции).

Применим линейную аппроксимацию зависимости интенсивности потока отказов от времени:

$$w(t) = \begin{cases} w_0 \left(k_0 + k_w \frac{t}{T} \right), & 0 \leq t \leq k_T T \\ w_0, & k_T T > t > T \end{cases}, \tag{39}$$

где: w – параметр потока отказов, 1/с; w_0 – исходное значение параметра потока отказов, 1/с; k_0 – доля дефектов, не обнаруженных диагностированием и обуславливающая параметр потока отказов в начале технологической операции; k_w – коэффициент пропорциональности в линейной составляющей зависимости параметра потока отказов от времени, 1/с²; k_T – доля продолжительности технологической операции, во время которой параметр потока отказов восстанавливается до исходного значения.

Коэффициент пропорциональности k_w определим из условия:

$$w(k_T T) = w_0. \tag{40}$$

Следовательно:

$$k_w = \frac{1 - k_0}{k_T}. \tag{41}$$

В случае нестационарного потока отказов, как известно из теории вероятностей:

$$p_n = \frac{a^n}{n!} e^{-a}. \tag{42}$$

$$a = \int_0^T w(t) dt = w_0 T \frac{2 - k_T + k_0 k_T}{2}. \tag{43}$$

$$p_n = \frac{\left(w_0 T \frac{2 - k_T + k_0 k_T}{2} \right)^n}{n!} e^{-w_0 T \frac{2 - k_T + k_0 k_T}{2}}. \tag{44}$$

где: a – количество отказов.

Сравнивая эту формулу с формулой закона Пуассона для стационарного пролив отказов, можно сделать вывод, что:

$$p_n(w_0 T, k_0, k_T) = p_n(w^* T). \quad (45)$$

$$w^* = w_0 \frac{2 - k_T + k_0 k_T}{2}, \quad (46)$$

где: w^* – приведенный параметр потока отказов, 1/с.

Тогда:

$$\mathbf{M}[\Delta \kappa] = k_1 \mathbf{M}[\omega] \mathbf{M}[\tau] w^* T. \quad (47)$$

$$\mathbf{M}[\Delta \kappa^2] = w^* T k_1^2 \mathbf{M}[\tau^2] \mathbf{M}[\omega^2] + (w^* T)^2 k_1^2 \mathbf{M}[\tau^2] \mathbf{M}[\omega]^2 \quad (48)$$

$$\mathbf{D}[\Delta \kappa] = w^* T k_1^2 \mathbf{M}[\tau^2] \mathbf{M}[\omega^2]. \quad (49)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{1}{w^* T} \cdot (v_\tau^2 + 1) \cdot (v_\omega^2 + 1)}, \quad (50)$$

где: v_c – коэффициент вариации потерь при обслуживании по состоянию.

Определим численные характеристики доли площади поля, которая оставалась необработанной при возникновении отказа. Для этого определим плотность распределения доли площади поля, обработанной до наступления отказа, перейдя от функции времени в функции от доли площади поля:

$$\varphi = \frac{t}{T}. \quad (51)$$

$$w(\varphi) = \begin{cases} w_0 (k_0 + k_w \varphi), & 0 \leq \varphi \leq k_T \\ w_0, & k_T > \varphi > 1 \end{cases} \quad (52)$$

$$f_\varphi(\varphi) = \frac{w(\varphi)}{\int_0^1 w(\varphi) d\varphi}. \quad (53)$$

Определим зависимость параметра потока отказов от доли площади поля, которая оставалась необработанной при возникновении отказа:

$$w(\omega) = \begin{cases} w_0 (k_0 + k_w (1 - \omega)), & 1 - k_T \leq \omega \leq 1 \\ w_0, & 0 > \omega > 1 - k_T \end{cases} \quad (54)$$

Определим плотность распределения доли площади поля, которая оставалась необработанной при возникновении отказа:

$$f_\omega(\omega) = \frac{w(\omega)}{\int_0^1 w(\omega) d\omega}. \quad (55)$$

Определим математическое ожидание доли площади поля, которая оставалась необработанной при возникновении отказа:

$$\mathbf{M}[\omega] = \int_0^1 \omega f_\omega(\omega) d\omega = 1 - \frac{k_T}{3} + \frac{2k_T - 3}{3k_0 k_T - 3k_T + 6}. \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}[\omega^2] &= \int_0^1 \omega^2 f_\omega(\omega) d\omega = \\ &= 1 + \frac{k_T^2 - 4k_T}{6} - \frac{k_T^2 - 4k_T + 4}{3k_0 k_T - 3k_T + 6}. \end{aligned} \quad (57)$$

$$v_\omega^2 = \frac{\mathbf{D}[\omega]}{(\mathbf{M}[\omega])^2} =$$

$$= \frac{3(2 - k_T k_0^*) \cdot (4 - k_T^3 k_0^* + 4k_T^2 k_0^* - 6k_T k_0^*)}{2(k_T^2 k_0^* - 3k_T k_0^* + 3)^2} - 1. \quad (58)$$

$$k_0^* = 1 - k_0, \quad (59)$$

где: k_0^* – предотвращенная часть потока отказов.

Следовательно:

$$v_c = \sqrt{\frac{v_\tau^2 + 1}{w_0 T} \cdot \frac{3(2 - k_T k_0^*) \cdot (4 - k_T^3 k_0^* + 4k_T^2 k_0^* - 6k_T k_0^*)}{(2 - k_T + k_0 k_T) \cdot (k_T^2 k_0^* - 3k_T k_0^* + 3)^2}}. \quad (60)$$

При экспоненциальном распределении продолжительности восстановлений машины:

$$v_{ce} = \sqrt{\frac{6 \cdot (4 - k_T^3 k_0^* + 4k_T^2 k_0^* - 6k_T k_0^*)}{w_0 T (k_T^2 k_0^* - 3k_T k_0^* + 3)^2}}. \quad (61)$$

где v_{ce} – коэффициент вариации потерь при экспоненциальном распределении продолжительности восстановлений.

Определим математическое ожидание потерь при обслуживании по состоянию:

$$\mathbf{M}[\Delta \kappa_c] = k_1 \mathbf{M}[\tau] \left(\frac{1}{2} - \frac{k_T k_0^*}{2} + \frac{k_T^2 k_0^*}{6} \right) w_0 T. \quad (62)$$

Рассмотрим случай, когда параметр потока отказов за время выполнения технологической операции не восстанавливается до своего исходного значения рис. 3.

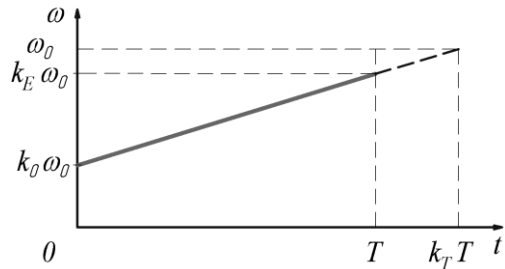


Рис. 3. Зависимость параметра потока отказов от времени

Fig. 3. Dependence of the failure intensity from time

В этом случае:

$$w(t) = w_0 \left(k_0 + k_w \frac{t}{T} \right), t \in [0 \leq t \leq T]. \quad (63)$$

Коэффициент пропорциональности определим из условия:

$$w(T) = k_E w_0, \quad (64)$$

где k_E – доля начального значения параметра потока отказов, до которой он восстанавливается в конце технологической операции.

Итак:

$$k_w = k_E - k_0. \quad (65)$$

$$w(t) = w_0 \left(k_0 + (k_E - k_0) \frac{t}{T} \right). \quad (66)$$

Определим эквивалентное значение параметра потока отказов и математическое ожидание количества отказов:

$$w^* = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt = w_0 \frac{k_E + k_0}{2}. \quad (67)$$

Определив численные характеристики доли площади поля, которая остается необработанной при наступлении отказа, вычислим численные характеристики потерь урожая по формулам (48-50):

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa] = k_1 \mathbf{M}[\tau] w_0 T \frac{2k_0 + k_E}{6}. \quad (68)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{1}{w_0 T} \cdot (v_\tau^2 + 1) \cdot \frac{3(3k_0 + k_E)}{(2k_0 + k_E)^2}}. \quad (69)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{6(3k_0 + k_E)}{w_0 T (2k_0 + k_E)^2}}. \quad (70)$$

Поскольку всегда $k_0 < k_E$, то это создает неудобства при изображении полученных зависимостей в декартовой системе координат. Для этого целесообразно перейти от доли параметра потока отказов в конце технологической операции до значения интервала времени, в течение которого поток параметра потока отказов достигает исходного значения (рис. 3). Преобразуем формулу (63):

$$w(t) = w_0 \left(k_0 + \frac{1 - k_0}{k_T} \cdot \frac{t}{T} \right). \quad (71)$$

Определим численные характеристики доли площади поля, которая остается необработанной при наступлении отказа, и численные характеристики потерь урожая по формулам (47, 50):

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa] = k_1 \mathbf{M}[\tau] w_0 T \frac{3k_0 k_T - k_0 + 1}{6k_T}. \quad (72)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{(v_\tau^2 + 1) \cdot (3k_T + 12k_0 k_T^2 - 3k_0 k_T)}{w_0 T (3k_0 k_T - k_0 + 1)^2}}. \quad (73)$$

При экспоненциальном распределении продолжительности восстановления:

$$v_{ce} = \sqrt{\frac{6k_T + 24k_0 k_T^2 - 6k_0 k_T}{w_0 T (3k_0 k_T - k_0 + 1)^2}}. \quad (74)$$

Теперь рассмотрим случай, когда в результате диагностирования и превентивных замен удастся предотвратить отказы в течение некоторого промежутка времени, по истечении которого параметр потока отказов нарастает линейно до исходного значения (рис. 4).

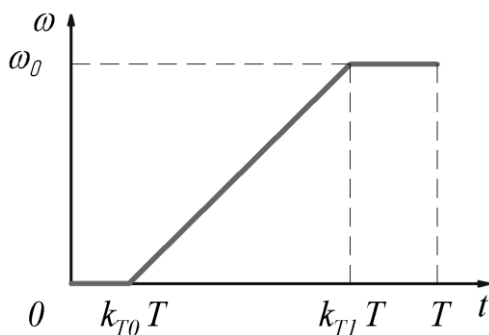


Рис. 4. Зависимость параметра потока отказов от времени

Fig. 4. Dependence of failure intensity from time

Рассмотрим кусочно-линейную аппроксимацию:

$$w(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq k_{T0}T \\ w_0 \left(k_0 + k_w \frac{t}{T} \right) & k_{T0}T < t \leq k_{T1}T, \\ w_0 & k_{T1}T < t \leq T \end{cases} \quad (75)$$

где k_{T0} – начальная доля продолжительности технологической операции, в ходе которой отказа отсутствуют; k_{T1} – завершающая часть продолжительности технологической операции, в ходе которой параметр потока отказов имеет исходное значение.

Коэффициенты, входящие в кусочно-линейной аппроксимации (75), определим из уравнений:

$$\begin{cases} w(k_{T0}T) = 0 \\ w(k_{T1}T) = w_0 \end{cases}. \quad (76)$$

$$k_w = \frac{1}{k_{T1} - k_{T0}}. \quad (77)$$

$$k_0 = -\frac{k_{T0}}{k_{T1} - k_{T0}}. \quad (78)$$

Определим эквивалентное значение параметра потока отказов:

$$w^* = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) dt = w_0 \frac{2 - k_{T0} - k_{T1}}{2}. \quad (79)$$

Определим численные характеристики доли площади поля, которая остается необработанной при наступлении отказа, по формулам (56, 57):

$$\mathbf{M}[\omega] = \frac{1 - k_{T0}}{3} + \frac{1 - 2k_{T1} + k_{T1}^2}{3(2 - k_{T0} - k_{T1})}. \quad (80)$$

$$\mathbf{M}[\omega^2] = \frac{k_{T0}^2 - 2k_{T0} + k_{T1}^2 - 2k_{T1} + 1}{6}. \quad (81)$$

Это позволяет вычислить численные характеристики потерь урожая по формулам (47-50):

$$\mathbf{M}[\Delta\kappa] = k_1 \mathbf{M}[\tau] w_0 T \frac{k_{T0}^2 + k_{T0}k_{T1} - 3k_{T0} + k_{T1}^2 - 3k_{T1} + 3}{6}. \quad (82)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{v_\tau^2 + 1}{w_0 T} \cdot \frac{3(2 - k_{T0} - k_{T1})(k_{T0}^2 - 2k_{T0} + k_{T1}^2 - 2k_{T1} + 2)}{(k_{T0}^2 + k_{T0}k_{T1} - 3k_{T0} + k_{T1}^2 - 3k_{T1} + 3)^2}}. \quad (83)$$

При экспоненциальном распределении продолжительности восстановления:

$$v_{ce} = \sqrt{\frac{6(2 - k_{T0} - k_{T1})(k_{T0}^2 - 2k_{T0} + k_{T1}^2 - 2k_{T1} + 2)}{w_0 T (k_{T0}^2 + k_{T0}k_{T1} - 3k_{T0} + k_{T1}^2 - 3k_{T1} + 3)^2}}. \quad (84)$$

Определим соотношение математических ожиданий и коэффициентов вариации потерь при обслуживании по техническому состоянию и корректирующем ремонте.

$$K_M = \frac{\mathbf{M}[\Delta\kappa_c]}{\mathbf{M}[\Delta\kappa]} = 1 - k_T k_0^* + \frac{k_T^2 k_0^{*2}}{3}. \quad (85)$$

$$K_v = \frac{v_c}{v} = \sqrt{\frac{9(2 - k_T k_0^*) \cdot (4 - k_T^3 k_0^{*2} + 4k_T^2 k_0^{*2} - 6k_T k_0^{*2})}{4(2 - k_T + k_0 k_T) \cdot (k_T^2 k_0^{*2} - 3k_T k_0^{*2} + 3)^2}}. \quad (86)$$

где K_M – соотношение математических ожиданий потерь при обслуживании по техническому состоянию и корректирующем ремонте; K_v – соотношение коэффициентов вариации потерь при обслуживании по состоянию и корректирующем ремонте.

Графики зависимостей (85, 86) показаны на рис. 5 и рис. 6.

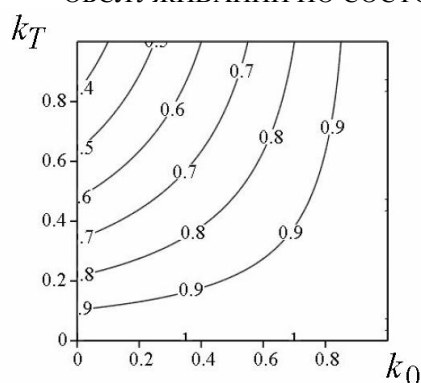


Рис. 5. Соотношение вариации потерь урожая при корректирующем ремонте и обслуживании по техническому состоянию

Fig. 5. Ratio of the expectations of the crop losses upon condition-based maintenance and corrective maintenance

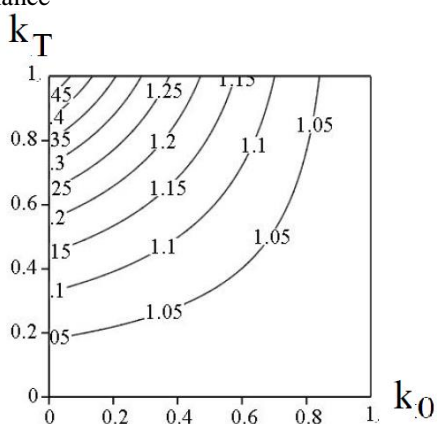


Рис. 6. Соотношение коэффициентов вариации потерь урожая при корректирующем ремонте и обслуживании по техническому состоянию

Fig. 6. Dependence of coefficient of variation of crop losses upon condition-based maintenance and corrective maintenance

Вычисляя значения численных характеристик потерь урожая, получим:

$$K_M = \frac{2k_0 + k_E}{3}. \quad (87)$$

$$K_V = \frac{v_c}{v} = \sqrt{\frac{9(3k_0 + k_E)}{4(2k_0 + k_E)^2}}, \quad (88)$$

или

$$K_M = k_0 + \frac{1 - k_0}{3k_T}. \quad (89)$$

$$K_V = \frac{v_c}{v} = \sqrt{\frac{9k_T(4k_0k_T - k_0 + 1)}{4(3k_0k_T - k_0 + 1)^2}}. \quad (90)$$

График зависимости (90) показан на рис. 7.

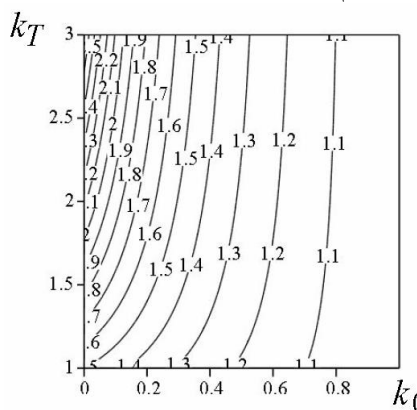


Рис. 7. Соотношение коэффициентов вариации потерь урожая при корректирующем ремонте и обслуживании по техническому состоянию

Fig. 7. Ratio of coefficients of variation of crop losses upon condition-based maintenance and corrective maintenance

Вычисляя значения численных характеристик потерь урожая, получим:

$$K_M = 1 - k_{T0} - k_{T1} + \frac{k_{T0}^2 + k_{T0}k_{T1} + k_{T1}^2}{3}. \quad (91)$$

$$K_V = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{(2 - k_{T0} - k_{T1})(k_{T0}^2 - 2k_{T0} + k_{T1}^2 - 2k_{T1} + 2)}{(k_{T0}^2 + k_{T0}k_{T1} - 3k_{T0} + k_{T1}^2 - 3k_{T1} + 3)^2}}. \quad (92)$$

ВЫВОДЫ

1. Получены зависимости численных характеристик (математическое ожидание, коэффициент вариации) потерь урожая вследствие отказов машины при выполнении технологической операции. Эти зависимости получены для двух стратегий технического обслуживания (корректирующего ремонта и обслуживания по состоянию), что позволило определить соотношения численных характеристик в зависимости от показателей качества обслуживания по состоянию.

2. Полученные зависимости могут использоваться при оптимизации правила превентивных замен при обслуживании по состоянию, что является перспективным направлением дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ковтун Ю. 2012.** Реализация биопотенциала сельхозкультур как показатель уровня индустриального земледелия. Техника и технологии АПК, № 11 (38), 31–35. (Украина)
2. **Ismail, Z.E., Abou-Elmagd A.E. and Abdel-Mageed A.E. 2010.** Timeliness costs in wheat production systems. *Misr J. Ag. Eng.* 27 (1), 75–89.
3. **Gunnarsson C., Spordly R. and Hansson P.A. 2005.** Costs for the Silage Harvest in Conventional and Organic Milk Production Timeliness. *Biosystems Engineering*, №92 (3), 285–293.

4. **Ahmad Mohammadi, Morteza Almasi, Alireza Masoudi, Saeed Minaei and Hamid Mashhadi Meighani. 2011.** Using Condition Monitoring to Estimate Repair and Maintenance Costs of Tractors in Iran. *Journal of American Science*, 7(5), 227–231.
5. **Кухтов В.Г. 2004.** Долговечность деталей шасси колесных тракторов. –Харьков: ХНАДУ, 292.
6. **Grinchenko O. and Alfiorov O. 2013.** Quickened defining tests with limiting combined regimens // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture., 15, №7, 36–39.
7. **Khodabakhshian R., Shakeri M. and Baradaran J. 2009.** Preventive Maintenance in Agricultural Machinery. *AIJSTPME* 2(2), 11-16.
8. **Abdelkarim D. Elfadil, Mamoun I. Dawelbeit, Abdalla S. Abdalla, Yousof E. Youfof. 2013.** Breakdowns and Associated Downtime for Trucks Employed in Sugarcane Transportation. *Gezira Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3, No. 1, 1-5.
9. **Sait M. Say and Alim Isik. 2010.** Reliability Analysis of Combine Harvesters. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 6 (1), 5 - 12.
10. **M. Poozesh, Mohtasebi S.S. Ahmadi H. and Asakereh A. 2012.** Determining the reliability function of farm tractors. *Elixir Project Mgmt.* 47, 9074-9078.
11. **Шевченко С.А. 2010.** Анализ влияния надежности машин технологического комплекса на вероятность выполнения производственного задания. *Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого*, №4, 30–36.
12. **Остапенко О. Н. 2013.** Риски сельскохозяйственных предприятий. *Экономика. Управление. Инновации*, № 2 (10),.
13. **Навроцкий С. 2008.** Систематизация рисков сельскохозяйственных предприятий. *Вестник КНУ им. Т. Шевченко. Экономика*, 105, 17-20. (Украина)
14. **Sukant K. Misra and Stan R. Spurlock. 1991.** Incorporating the impacts of uncertain fieldwork time on whole-farm risk-return levels: a target MOTAD approach. *Southern journal of agricultural economics*, December, 9–18.
15. **Сидорчук А., Сидорчук Л. 2014.** Метод создания концептуальной модели управленческо-информационных систем полеводства. *MOTROL, Commission of Motorization and energetics in agriculture*, 16, No.4, 26-31.
16. **Алескерова Ю.В. 2012.** Сельскохозяйственное страхование в зарубежных странах. *Сборник научных работ ВНАУ*, №4 (70), 2, 3–8. (Украина)
17. **Тумочко V., Padyuka R. 2014.** Prediction of losses in agricultural production output. *ECONTECHMOD*, 3. №4, 55–58.
18. **Кацитадзе Д.В., Сарджвеладзе Н.Н. 2012.** Теоретические основы для расчета единичных и комплексных показателей надежности сельскохозяйственной техники. *Machines, technologies, materials*, 6, No. 1, 1-4.
19. **Kalbarczyk R. 2009.** Reaction of field cucumber (*Cucumis sativus* L.) to the delay of agrotechnical dates and phenological phases in Poland. *Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun*, LVII, No. 5, 159–166.
20. **Dash R.C. and Sirohi N.P.S. 2008.** A Computer Model to Select Optimum Size of Farm Power and Machinery for Paddy-Wheat Crop Rotation in Northern India. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript, PM 08 012., X 1–12.
21. **Старцев А.В., Низамутдинова Н.С. 2009.** Обоснование паритетных цен на продукцию сельского хозяйства и сельхозмашиностроения (на примере уборочной техники). *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 7 (57), 73–77.
22. **Шевченко С. 2013.** Исследование влияния длительности восстановления машины на потери продукции растениеводства. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*, 15, №7, 40-44.
23. **Пастухов В. И. 2006.** Обоснование оптимальных комплексов машин для механизации полевых работ: Дис.. д-ра техн. наук: 05.05.11 / Харьков: ХНТУСГ им Петра Василенко, 419.
24. **Eftymios Gr. Mygdakos. 2009.** Factors affecting picker capacity, area harvested and harvesting cost of cotton. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7 (3&4), 214 - 223.

HARVEST LOSSES UPON CORRECTIVE MACHINE MAINTENANCE AND CONDITION-BASED MAINTENANCE BEFORE TECHNOLOGICAL OPERATION

Summary. Failures crop machinery lead to delays in execution of technological operations and loss of yield. Since these losses are random, when planning production activities appropriate to carry out probabilistic risk analysis.

The purpose of this paper is to compare crop losses upon corrective machine maintenance and condition-based maintenance. The cases when technological operation is done by one machine and the dependence of yield loss time operation is linear are analyzed. Expectation of crop losses and their coefficient of variation upon corrective machinery maintenance are defined (at the conditions that parameter of flow of the crop machinery failures is constant). At that it is considered the more of field if harvested before machinery failures the less is the harvest losses. These results are further used to compare maintenance and corrective maintenance of the technical condition.

Condition-based maintenance reduces the failure rate and the appropriate crop losses. In this article we analyzed the impact of diagnosis and preventive replacement of units before technological operations on reducing of crop losses.