

EDN: RNSRZO

DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-81-88

Научная статья
УДК 631.356.46

Оптимизация финишной обработки трансмиссионного вала картофелеуборочного комбайна

Александра Васильевна Неменко,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: valesan@list.ru;

Михаил Михайлович Никитин,
старший преподаватель,
e-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Российская Федерация

Реферат. Специфика картофелеуборочного комбайна включает разнесенный в пространстве привод его агрегатов от внешнего двигателя в условиях стохастического характера работы. Это усложняет нагруженность его элементов, в том числе трансмиссионных валов, и создает предпосылки для снижения их долговечности, увеличивая количество установленных отказов. Противодействие указанному процессу оказывает обработка трансмиссионных валов, направленная на уменьшение концентрированных дефектов. (*Цель исследования*) Разработка целевой функции для управления процессом финишной обработки трансмиссионных валов картофелеуборочного комбайна по критерию максимизации выхода годных при контроле концентрированных дефектов. (*Материалы и методы*) Для реализации метода требуется оборудование с возможностью программного управления по каналу технического зрения. В схеме управления используются математический аппарат описания дискретных и непрерывных случайных величин, марковские процессы с дискретным временем и непрерывным пространством состояний, метод наибольшего правдоподобия, а также методы численной оптимизации в многофакторном пространстве. (*Результаты и обсуждение*) Получены формулы для расчета вероятностей успешного и неудачного исходов финишной обработки по критерию наличия концентрированных дефектов. Представлены результаты апробации предложенного алгоритма для прогнозных оценок выхода годных изделий предлагаемым методом на основании промежуточных замеров характеристик дефекта в процессе обработки. Предложена схема использования полученных результатов в производственном процессе изготовления трансмиссионного вала картофелеуборочного комбайна. (*Выводы*) Предложен алгоритм управления финишной обработкой трансмиссионного вала на основании прогнозной оценки вероятности изготовления изделия, удовлетворяющего техническим условиям совместно по геометрии и чистоте поверхности. В качестве целевой функции рассмотрена прогнозная вероятность получения поверхности с заданной чистотой при отсутствии дефектов, превышающих допустимое значение. Решение задачи достигается подбором соответствующих технологических параметров.

Ключевые слова: картофелеуборочный комбайн, трансмиссия, финишная обработка, чистота поверхности, концентрированные дефекты.

■ **Для цитирования:** Неменко А.В., Никитин М.М. Оптимизация финишной обработки трансмиссионного вала картофелеуборочного комбайна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. №1. С. 81-88. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-81-88. EDN: RNSRZO.

Scientific article

Optimizing the Finishing Treatment of Potato Harvester Transmission Shafts

Alexandra V. Nemenko,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: valesan@list.ru;

Mikhail M. Nikitin,
senior lecturer,
e-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

Abstract. The potato harvester's distinctive specifications include the spatially segregated drive of its units from an external engine, operating under stochastic conditions. This setup complicates the loading of its components, including transmission shafts, and creates the prerequisites for decreased durability, leading to an upsurge in fatigue failures. To counteract this process, transmission shafts undergo a special treatment aimed at mitigating concentrated defects. (*Research purpose*) The purpose of this research is to formulate an objective function for controlling the finishing treatment of transmission shafts in a potato harvester. This function is designed to maximize potato yield while monitoring concentrated defects. (*Materials and methods*) The implementation of

the method requires equipment capable of being controlled through a technical vision channel. The control scheme employs mathematical tools for describing discrete and continuous random variables, Markov processes with discrete time and continuous state space, the maximum likelihood method, and methods of numerical optimization in multifactor space. (*Results and discussion*) The research has yielded formulas for calculating the probabilities of successful and unsuccessful outcomes of finishing treatment based on the criterion of concentrated defect presence. The paper provides the results of testing the proposed algorithm for predicting the yield of viable products using the proposed method based on interim measurements of defect characteristics during the treatment process. Additionally, a scheme is proposed for integrating the obtained results into the production process of manufacturing transmission shafts for potato harvesters. (*Conclusions*) An algorithm has been proposed to control the finishing treatment of the transmission shaft based on a predictive assessment of the probability of manufacturing a product that adheres to the specified technical criteria regarding geometry and surface cleanliness. The predictive probability of achieving a surface with the required cleanliness without exceeding permissible defect limits is considered as the objective function. The solution to the problem is achieved through the selection of appropriate technological parameters.

Keywords: potato harvester, transmission, finishing, surface cleanliness, concentrated defects.

■ **For citation:** Nemenko A.V., Nikitin M.M. Optimizing the finishing treatment of potato harvester transmission shafts. *Agricultural machinery and technologies*. 2024. Vol. 18. N1. 81-88 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-81-88. EDN: RNSRZO.

Привод агрегатов картофелеуборочного комбайна, как правило, осуществляется от внешней силовой установки трактора с помощью системы передач, включающей трансмиссионные валы [1]. В перспективной схеме картофелеуборочного комбайна движение в механизмах просева и сепарации клубней также передается через трансмиссионные валы [2].

Отмечено, что при обработке комбайном 1 га в бункер вместе с картофелем может поступать до 1000 т почвенных примесей [3]. Это создает предпосылки для постоянного контакта открытых элементов трансмиссии с образующейся пылью, которая в случае тяжелых грунтов обладает абразивными свойствами [4]. Появление сети царапин на поверхности валов создает эффект концентрации напряжений, снижая ресурс изделия, работающего в условиях переменных динамических нагрузок [5]. Выход из строя трансмиссионного вала, как правило, приводит к отказу комбайна. Статистика по отечественным и зарубежным картофелеуборочным комбайнам показывает значительную (до 60%) долю усталостных отказов [6]. Это объясняется разветвленной кинематической схемой оборудования.

Диагностика постепенно развивающегося отказа может быть выполнена сравнением моментов сопротивления, возникающих при прокрутке всего механизма комбайна под нагрузкой и на холостом ходу [7]. Кроме того, постепенный отказ вызывает деформации оборудования и повышенные нагрузки на гидросистему, что является источником протечки масла и увеличивает его расход [8].

Общей тенденцией повышения ресурса циклически нагружаемых изделий, в полной мере применимой и к трансмиссионным валам, является повышение сопротивления усталости на этапе изготовления [9]. Отметим, что при этом также может быть

повышена долговечность элементов экстерьера, не участвующих в процессе уборки, вследствие снижения уровня вибраций, передающихся на них [10].

Обработка поверхности вала до высоких классов чистоты при отсутствии концентрированных дефектов увеличивает предел выносливости вала в условиях циклических нагрузок [11]. Финишную обработку, как правило, проводят тонким шлифованием или полированием [12]. Гранулометрический состав большинства применяемых абразивов содержит фракции разной степени крупности [13]. В результате процессы финишной обработки не могут рассматриваться как полностью детерминированные [14], поскольку существует вероятность получения медленно устранимых на данной стадии концентрированных дефектов (точечных – ямок или линейных – царапин) вследствие случайного заноса на поверхность изделия более крупных частиц, присутствующих в абразивных материалах.

В зависимости от требований к чистоте поверхности при определенном количестве таких дефектов приходится прекращать обработку более тонким абразивом и возвращаться к прежним стадиям с потерей времени и абразивного материала [15]. Кроме того, при строгих требованиях к геометрическим размерам детали существует риск испортить заготовку, выбрав припуск на обработку и не устранив концентрированные дефекты [16].

Методы контроля поверхностей по средней и максимальной шероховатости не учитывают концентрированные дефекты, которые, как правило, лежат в пределах нескольких предыдущих классов чистоты и могут быть обнаружены визуально или с помощью системы технического зрения. Для количественного описания концентрированных дефектов используются величины, обладающие свойствами математической меры.

Цель исследования: оптимизация процесса финишной обработки трансмиссионного вала картофелеуборочного комбайна по критерию максимизации успешного завершения единичного процесса при совместных допусках на геометрию и чистоту поверхности вала.

Материалы и методы. Для реализации метода требуется оборудование для финишной обработки валов с возможностью программного управления по каналу технического зрения. В схеме управления применяются: полученные авторами формулы; математический аппарат описания дискретных и непрерывных случайных величин; марковские процессы с дискретным временем и непрерывным пространством состояний; метод наибольшего правдоподобия; методы численной оптимизации в многофакторном пространстве. Используется вероятностная интерпретация процесса финишной обработки, при которой располагаемый временной интервал разделен на равные диапазоны, в которых измеряются максимальное, минимальное, начальное и конечное значения выбранного показателя концентрированных дефектов. Измеренные значения трактуются как случайные величины, и на их основании производится прогноз и управление.

Результаты и обсуждение. Считаем, что по шероховатости поверхность трансмиссионного вала удовлетворяет критериям соответствия классу, до которого в данный момент она обрабатывается, но на поверхности присутствуют концентрированные дефекты. Обработка будет проводиться, пока мера дефектов не станет либо меньше предустановленного значения, либо больше второго предустановленного значения. В первом случае деталь обрабатывается до следующего класса чистоты более тонким абразивом, а во втором заготовка считается испорченной. Требуется сформировать управляющее воздействие на процесс обработки, максимизирующее первый из этих исходов.

Считаем, что существуют параметры технологического процесса $p_1, p_2, \dots, p_k$, влияющие на чистоту поверхности, которые предполагается варьировать в ходе обработки. Технологический процесс условно делится на интервалы равной продолжительности, по завершении каждого интервала возможно управляющее воздействие варьированием вектора параметров. В качестве параметров рассматриваются частота вращения инструмента, технологическое усилие, интенсивность подачи абразива и смазочно-охлаждающей жидкости и ряд других.

Составляется целевая функция процесса, максимизирующая вероятность его успешного завершения. На каждом шаге проверяется оптимальность поддерживаемого режима обработки и в случае отклонений вносится корректирующее воздействие по вектору параметров.

Построение целевой функции эффективности процесса обработки

Рассмотрим дефекты с непрерывной мерой, в частности, суммарную длину всех царапин на изделии. Считаем, что в начальный момент обработки разность между верхним предельным и текущим значениями меры дефектов составляет x (мм), а между текущим и нижним предельным значениями y (мм).

По завершении каждого из интервалов обработки полагаем известными значения начальной меры дефектов q_{ni} , наибольшей q_{max} и наименьшей на интервале q_{min} .

Рассмотрим при фиксированном векторе параметров $p_1, p_2, \dots, p_k$ вероятности неудачного и успешного исходов обработки P_x и P_y для случая непрерывной меры дефектов. Показатели вероятности выражаются безразмерными величинами.

Введем разности $\alpha = q_{max} - q_{ni}$; $\beta = q_{ni} - q_{min}$; $\lambda = q_{ni+1} - q_{ni}$ как независимые случайные величины, причем их функции распределения $F(t)$, $G(t)$ и $V(t)$ не зависят от номера интервала i . Кроме того, считаем, что для этих величин существуют конечные условные плотности вероятностей $f(t|p_1, p_2, \dots, p_k)$, $g(t|p_1, p_2, \dots, p_k)$ и $v(t|p_1, p_2, \dots, p_k)$, полученные в предположении, что вектор параметров технологического процесса неизменен.

Далее, используя математический аппарат [17] применительно к поставленной задаче, получим следующие формулы:

$$P_x(p_1, p_2, \dots, p_k) = P_{0x}(p_1, p_2, \dots, p_k) + \frac{P_{1x}(p_1, p_2, \dots, p_k)}{1 - \int_{-y}^x v(a|p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot r_0(x-a, y+a) da}, \quad (1)$$

$$P_y(p_1, p_2, \dots, p_k) = P_{0y}(p_1, p_2, \dots, p_k) + \frac{P_{1y}(p_1, p_2, \dots, p_k)}{1 - \int_{-y}^x v(a|p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot r_0(x-a, y+a) da}, \quad (2)$$

где $P_{0x}(p_1, p_2, \dots, p_k)$ и $P_{0y}(p_1, p_2, \dots, p_k)$ – вероятности неудачного и удачного исхода обработки на первом интервале (если непрерывная мера дефектов превысила верхнее контрольное значение, исход считается неудачным, если меньше нижнего контрольного значения, исход удачный); a – переменная интегрирования (уходит при взятии интеграла), мм; $P_{1x}(p_1, p_2, \dots, p_k)$ и $P_{1y}(p_1, p_2, \dots, p_k)$ – вероятности неудачного и успешного исхода обработки на втором интервале; $r_0(x-a, y+a)$ – вероятность незавершенности процесса на первом интервале при условии, что верхнее контрольное значение меры дефектов больше начального на величину $(x-a)$ мм, а нижнее контрольное значение меньше начального на $(y+a)$ мм; $v(a|p_1, p_2, \dots, p_k)$ – ус-

ловная плотность вероятности случайной величины γ в точке ($t=a$) в предположении, что вектор параметров равен $(p_1, p_2, \dots, p_k)$.

Входящие в формулы (1) и (2) вероятности исходов обработки на первом интервале $P_{0x}(p_1, p_2, \dots, p_k)$ и $P_{0y}(p_1, p_2, \dots, p_k)$ соответственно:

$$P_{0y} = \int_0^x f(t | p_1, \dots, p_k) dt \int_y^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt + \frac{\left(\int_y^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt \right)^2 \cdot \int_x^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt}{\int_x^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt + \int_y^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt}, \quad (3)$$

$$P_{0x} = \int_x^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt \int_0^y g(t | p_1, \dots, p_k) dt + \frac{\left(\int_x^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt \right)^2 \cdot \int_y^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt}{\int_x^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt + \int_y^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt}, \quad (4)$$

$$r_0(a) = \int_0^{x-a} f(t | p_1, \dots, p_k) dt \int_0^{y+a} g(t | p_1, \dots, p_k) dt. \quad (5)$$

Вероятности исходов обработки на втором интервале определяются соотношениями:

$$P_{1x}(p_1, p_2, \dots, p_k) = r_1 \cdot \left(\int_x^\infty v(t | p_1, \dots, p_k) dt + \int_{-y}^x v(a | p_1, \dots, p_k) \cdot P_{0x}(a) da \right), \quad (6)$$

$$P_{1y}(p_1, p_2, \dots, p_k) = r_1 \cdot \left(\int_{-\infty}^{-y} v(t | p_1, \dots, p_k) dt + \int_{-y}^x v(a | p_1, \dots, p_k) \cdot P_{0y}(a) da \right), \quad (7)$$

где $P_{0x}(a)$ – вероятность неудачного исхода обработки на первом интервале в предположении, что верхнее контрольное значение меры дефектов больше начального значения на $(x-a)$, мм, а нижнее меньше начального на $(y+a)$ мм; $P_{0y}(a)$ – вероятность неудачного исхода обработки на первом интервале при том же предположении; r_1 – вероятность переноса обработки на следующие интервалы.

Эти вероятности можно найти по формулам:

$$P_{0x}(a) = \int_{x-a}^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt \int_0^{y+a} g(t | p_1, \dots, p_k) dt + \frac{\left(\int_{x-a}^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt \right)^2 \cdot \int_{y+a}^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt}{\int_{x-a}^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt + \int_{y+a}^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt}, \quad (8)$$

$$P_{0y}(a) = \int_0^{x-a} f(t | p_1, \dots, p_k) dt \int_{y+a}^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt + \frac{\left(\int_{y+a}^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt \right)^2 \cdot \int_{x-a}^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt}{\int_{x-a}^\infty f(t | p_1, \dots, p_k) dt + \int_{y+a}^\infty g(t | p_1, \dots, p_k) dt}, \quad (9)$$

$$r_1 = \int_0^x f(t | p_1, \dots, p_k) dt \int_0^y g(t | p_1, \dots, p_k) dt. \quad (10)$$

Рассмотрим формулы (1)-(10) для случая дефектов с дискретной мерой, таких как выбоины, неровности и подобные неоднородности обработки. Конечные выборки рассмотренных разностей $\alpha = q_{\max i} - q_{\min i}$, $\beta = q_{\min i} - q_{\min i}$, $\lambda = q_{\min i+1} - q_{\min i}$ получены обработкой предшествующего вектора значений $q(t)$. Заменив их условные плотности вероятностей $f(t|p_1, p_2, \dots, p_k)$, $g(t|p_1, p_2, \dots, p_k)$ и $v(t|p_1, p_2, \dots, p_k)$ для непрерывного случая дискретными условными вероятностями $f_i(p_1, p_2, \dots, p_k)$, $g_i(p_1, p_2, \dots, p_k)$ и $v_i(p_1, p_2, \dots, p_k)$ принятия соответствующей разностью фиксированного значения i в предположении, что вектор параметров технологического процесса принял значение $(p_1, p_2, \dots, p_k)$, а также считая дискретными расстояния от начального значения меры дефектов до ее предельных уровней x и y , представим формулы (1) и (2) в дискретном виде:

$$P_x(p_1, p_2, \dots, p_k) = P_{0x}(p_1, p_2, \dots, p_k) + \frac{P_{1x}(p_1, p_2, \dots, p_k)}{1 - \sum_{j=-y}^x v_j(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot r_0(j)}, \quad (11)$$

$$P_y(p_1, p_2, \dots, p_k) = P_{0y}(p_1, p_2, \dots, p_k) + \frac{P_{1y}(p_1, p_2, \dots, p_k)}{1 - \sum_{j=-y}^x v_j(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot r_0(j)}, \quad (12)$$

где j – дискретный индекс суммирования, используемый вместо непрерывной переменной интегрирования a в формулах (1)-(10); $r_0(j)$ – вероятность не завершения процесса на первом интервале при условии, что верхнее контрольное значение больше начального значения меры дефектов на $(x-j)$ мм, а нижнее контрольное значение меньше начального на $(y+j)$ мм.

Вероятности исходов обработки на первом интервале в формулах (11), (12) и для дефектов с непрерывной мерой, задававшиеся формулами (3)-(5), принимают вид:

$$P_{0x}(p_1, p_2, \dots, p_k) = \sum_{i=x}^\infty f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot \sum_{i=0}^y g_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \frac{\left(\sum_{i=x}^\infty f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \right)^2 \cdot \sum_{i=y}^\infty g_i(p_1, p_2, \dots, p_k)}{\sum_{i=x}^\infty f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \sum_{i=y}^\infty g_i(p_1, p_2, \dots, p_k)}, \quad (13)$$

$$P_{0y}(p_1, p_2, \dots, p_k) = \sum_{i=y}^{\infty} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot \sum_{i=0}^x f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \frac{\left(\sum_{i=y}^{\infty} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \right)^2 \cdot \sum_{i=x}^{\infty} f_i(p_1, p_2, \dots, p_k)}{\sum_{i=x}^{\infty} f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \sum_{i=y}^{\infty} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k)}, \quad (14)$$

$$r_0(j) = \sum_{i=0}^{x-j} f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot \sum_{i=0}^{y+j} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k). \quad (15)$$

Вероятности исходов обработки на втором интервале преобразуем к виду:

$$P_{1x}(p_1, p_2, \dots, p_k) = r_1 \cdot \left(\sum_{i=x}^{\infty} v_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \sum_{j=-y}^x v_j(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot P_{0x}(j) \right), \quad (16)$$

$$P_{1y}(p_1, p_2, \dots, p_k) = r_1 \cdot \left(\sum_{i=-\infty}^{-y} v_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \sum_{j=-y}^x v_j(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot P_{0y}(j) \right), \quad (17)$$

где $P_{0x}(t)$ – вероятность неудачного исхода обработки на первом интервале в предположении, что верхнее контрольное значение больше начального значения меры дефектов на $(x-j)$ единиц, а нижнее контрольное значение меры дефектов меньше начального значения на $(y+j)$ единиц; $P_{0y}(t)$ – вероятность неудачного исхода обработки на первом интервале при том же предположении; r_1 – вероятность переноса обработки на следующие интервалы.

Эти величины определим для дефектов с дискретной мерой по аналогии с формулами (8)-(10):

$$P_{0x}(j) = \sum_{i=x-j}^{\infty} f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot \sum_{i=0}^{y+j} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \frac{\left(\sum_{i=x-j}^{\infty} f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \right)^2 \cdot \sum_{i=y+j}^{\infty} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k)}{\sum_{i=x-j}^{\infty} f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \sum_{i=y+j}^{\infty} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k)}, \quad (18)$$

$$P_{0y}(j) = \sum_{i=y}^{\infty} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot \sum_{i=0}^x f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \frac{\left(\sum_{i=y+j}^{\infty} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \right)^2 \cdot \sum_{i=x-j}^{\infty} f_i(p_1, p_2, \dots, p_k)}{\sum_{i=x-j}^{\infty} f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) + \sum_{i=y+j}^{\infty} g_i(p_1, p_2, \dots, p_k)}, \quad (19)$$

$$r_1 = \sum_{i=0}^x f_i(p_1, p_2, \dots, p_k) \cdot \sum_{i=0}^y g_i(p_1, p_2, \dots, p_k). \quad (20)$$

Учитывая эти соотношения, представим формулы (11) и (12) как полные аналоги формул (1) и (2) для вероятностей исходов обработки в случае дефектов с дискретной мерой.

Оптимизация алгоритма управления технологическим процессом с помощью целевой функции

Полагаем, что все связи существенно индетерминированы. В качестве аппарата математического описания влияния параметров технологического процесса на меру дефектов применим условные плотности распределения тех же разностей в предположении, что набор параметров равен заданному вектору значений.

Используя последовательности измеренных разностей меры дефектов на начальных стадиях процесса обработки, зададимся классами плотностей вероятности, параметры которых будем искать. В частности, для разностей α и β , которые по своей природе могут быть только положительными, примем усеченное распределение Коши с плотностями соответственно

$$f(t) = \frac{2 \cdot a_f}{\left(\pi + 2 \cdot \arctg \frac{b_f}{a_f} \right) \cdot (a_f^2 + (t - b_f)^2)}, \quad (21)$$

$$g(t) = \frac{2 \cdot a_g}{\left(\pi + 2 \cdot \arctg \frac{b_g}{a_g} \right) \cdot (a_g^2 + (t - b_g)^2)}, \quad (22)$$

где a_f, b_f, a_g, b_g – параметры, подлежащие определению, безразмерные величины; t – заранее заданное значение, имеющее размерность используемой меры дефектов.

Согласно принципу наибольшего правдоподобия [18], для заданных выборок α_i и β_i , состоящих из n элементов, параметры a и b с соответствующим индексом должны максимизировать произведение n функций, полученных из формул (21) и (22) заменой в каждой из них значения t значением конкретной реализации соответствующей случайной величины, взятой из выборки. Это произведение даст функцию правдоподобия:

• для формулы (21)

$$L_{\alpha} = \frac{a_f^n}{\left(\pi + 2 \cdot \arctg \frac{b_f}{a_f} \right)^n \cdot \prod_{i=1}^n (a_f^2 + (\alpha_i - b_f)^2)}, \quad (23)$$

в которой будем искать параметры a_f и b_f ;

• для формулы (22):

$$L_{\beta} = \frac{a_g^n}{\left(\pi + 2 \cdot \arctg \frac{b_g}{a_g} \right)^n \cdot \prod_{i=1}^n (a_g^2 + (\beta_i - b_g)^2)}, \quad (24)$$

определению подлежат параметры a_g и b_g .

Для разности γ , принимающей произвольные значения, примем непосредственное распределение Коши с плотностью:

$$v(t) = \frac{a_v}{\pi \cdot (a_v^2 + (t - b_v)^2)}. \quad (25)$$

Аналогично составим функцию правдоподобия

$$L_{\gamma} = \frac{a_v^n}{\prod_{i=1}^n (a_v^2 + (\beta_i - b_v)^2)}, \quad (26)$$

которую должны максимизировать величины a_v и b_v .

По выборкам составим гистограммы соответствующих им случайных величин α , β , γ с единичным шагом. Получим непараметрические оценки вероятностей появления каждой величины в виде дискретных законов распределения f_i , g_i , v_i задающих вероятность нахождения каждой из величин в интервале i . Используя полученные законы в формулах (11)–(20) к границам x и y из каждой задачи, получим дискретную целевую функцию обработки для фиксированного набора параметров.

Для контроля обрабатываемого изделия по дефектам с непрерывной мерой максимизируем формулы (23), (24) и (26), в которых использовались данные из последовательности тестового набора с помощью метода движения по градиенту [19]. Получаем значения параметров распределений (21), (22) и (25).

Используя эти распределения в формулах (1)–(10), получим вероятность успешного завершения процесса обработки. При этом время расчета на типовом оборудовании с производительностью 109 операций с плавающей запятой в секунду составляет несколько секунд, что существенно меньше, чем при решении сходных задач с помощью нейросети [20].

Непосредственно задача управления решается перебором параметров в их областях определения с целью максимизации вероятности изготовления вала с дефектами в пределах допусков.

Максимизирующие значения применяются на следующем шаге, по завершении которого также проводятся контроль дефектов и управление технологическим процессом [21]. Для набора статистических данных по дефектам представляется перспективным проводить замеры по окончании каждой операции автоматически, в частности, используя систему технического зрения [21].

Выводы. Рассмотрена оптимизация управления финишной обработкой трансмиссионного вала картофелеуборочного комбайна. Предложен алгоритм управления обработкой вала на основании прогнозной оценки вероятности изготовления изделия, удовлетворяющего техническим условиям совместно по геометрии и чистоте получаемой поверхности.

В качестве целевой функции, которая должна максимизироваться путем подбора технологических параметров, рассмотрена прогнозная вероятность получения поверхности с заданной общей чистотой при условии, что мера отдельных концентрированных дефектов оказывается меньше нижнего допустимого значения. При неудачном исходе мера отдельных дефектов превосходит верхнее допустимое значение.

Процесс обработки рассматривается как марковское случайное блуждание меры дефектов между поглощающими уровнями, образованными допустимыми значениями. На этом основании в качестве непосредственной реализации целевой функции предлагаются формулы (2) и (12) для дефектов с непрерывной и дискретной мерой соответственно. Для набора статистических данных по дефектам целесообразно проводить замеры по окончании каждой обрабатываемой операции автоматически, в частности, используя систему технического зрения.

Задача формирования управляющего воздействия решается путем перебора на конечном множестве векторов параметров технологического процесса, соответствующих условным плотностям вероятности, которые используются в выражениях (2) и (12). В качестве параметров рассматриваются частота вращения инструмента, технологическое усилие, интенсивность подачи абразива и смазочно-охлаждающей жидкости и ряд других.

Для составления условных плотностей вероятности требуется большой объем статистических данных, тем не менее, в условиях производства со временем происходит смена режимов обработки, и такие данные неявно могут присутствовать.

Формулы (1) и (2), (11) и (12) являются аналогами выхода годных для единичного процесса и, при допущении гипотезы об эргодичности операций процесса финишной обработки (одни и те же закономерности проявляются и за короткое время на большой серии деталей, и длительно на малой серии), а также при достаточно большом количестве стадий обработки одного вала, образуют тот же объект управления, что и классическая формула.

При этом операции остаются те же, но на выходе мы получаем возможность управлять изготовлением единичного объекта и на этом принципе поднимать общую эффективность финишной обработки трансмиссионных валов картофелеуборочного комбайна при их изготовлении и в эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сорокин А.А., Пономарёв А.Г. Конструктивные схемы картофелеуборочных комбайнов в аграрном секторе России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013. №6. С. 22–25. EDN: RVTBIX.
2. Успенский И.А., Рембалович Г.К., Костенко М.Ю., Безносюк Р.В. Оценка перспективной технологической схемы картофелеуборочного комбайна // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*.

2018. N1 (49). С. 262-269. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-01-262-269.
3. Бышов Н.В., Борычев С.Н., Рембалович Г.К. и др. Математическая модель технологического процесса картофелеуборочного комбайна при работе в условиях тяжелых суглинистых почв // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А.Костычева*. 2014. N4 (24). С. 59-64.
 4. Бышов Н.В., Борычев С.Н., Успенский И.А. и др. Технологическое и теоретическое обоснование конструктивных параметров органов вторичной сепарации картофелеуборочных комбайнов для работы в тяжелых условиях // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2012. N4(16). С. 87-90. EDN: PLVONF.
 5. Бобрышов А.В., Лиханос В.А. Расчет максимальных динамических нагрузок в трансмиссиях машинно-тракторных агрегатов // *SWorld*. 2014. Т. 4. N3. С. 24.
 6. Королев А.Е. Безотказность картофелеуборочных комбайнов // *NovaUm.Ru*. 2017. N10. С. 38-40. EDN: YNDSNI.
 7. Овчинникова Н.И., Боннет В.В., Косарева А.В. Диагностирование технического состояния приводов картофелеуборочного комбайна // *Аграрный научный журнал*. 2021. N9. С. 95-97. DOI: 10.28983/asj.2021i9pp95-97.
 8. Годжаев З.А., Сапьян Ю.Н., Колос В.А., Горшков М.И. Расход и потери горюче-смазочных материалов в мобильной сельскохозяйственной технике // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N2. С. 9-14. DOI: 10.22314/207375992017.2.914. EDN: YODAPN.
 9. Лобачевский Я.П., Миронов Д.А., Миронова А.В. Основные направления повышения ресурса быстроизнашиваемых рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N1. С. 41-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50.
 10. Денисов В.А., Славкина В.Э., Алехина Р.А., Касимов Р.М. Повышение долговечности деталей экстерьера сельскохозяйственной техники с использованием композиционных материалов // *Технический сервис машин*. 2023. Т. 61. N4(153). С. 90-96. DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-90-96. EDN: VHLKIM.
 11. Arola D., Williams C.L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces. *International Journal of Fatigue*. 2002. Vol. 24. N9. 923-930. DOI: 10.1016/S0142-1123(02)00012-9.
 12. Барсуков Г.В., Кожус О.Г., Винокуров А.Ю. Исследование абразивной способности искусственных и природных абразивов, обеспечивающих производительность гидроабразивного резания // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2018. N2. С. 34-40. EDN: UXZGMJ.
 13. Lavrinenko V.I. Current advances in the development of abrasive tools and Investigation of diamond abrasive machining processes (Materials science approach). *Review. Journal of Superhard Materials*. 2018. Vol. 40. 348-354. DOI: 10.3103/S1063457618050064.
 14. Отений Я.Н., Никифоров Н.И., Журавлев А.И. Комбинированная обработка длинных валов // *СТИН*. 2006. N6. С. 36-39.
 15. Сковородин В.Я., Антипов А.В. Влияние финишной отделочно-антифрикционной обработки валов на амплитудные параметры шероховатости поверхности // *Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения*. 2018. С. 387-391.
 16. Неменко А.В., Никитин М.М. Управление качеством изделия при обработке металлов резанием // *Современные технологии: проблемы и перспективы*. 2019. С. 117-120. EDN: TQCRLW.
 17. Kobayashi H., Mark B., Turin W. Probability, random processes and statistical analysis. Cambridge University Press, 2012. 813.
 18. Cappe' O., Moulines E., Ryde'n T. Inference in hidden Markov models. Springer, 2005. 652.
 19. Wang B., Zhao W., Du Ya. et al. Prediction of fatigue stress concentration factor using extreme learning machine. *Computational Materials Science*. 2016. Vol. 125. 136-145. DOI: 10.1016/j.commatsci.2016.08.035.
 20. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing. *Journal of Physics: IOP Publishing*. 2021. Vol. 2061. N1. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022.
 21. Ragavanantham S., Kumar S.S., Shyam M.S. Optimisation of shutter speed in machine vision technique for monitoring grinding wheel loading. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 766. 878-883. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767:878-883.

REFERENCES

1. Sorokin A.A., Ponomarev A.G. Design diagrams of potato harvesters in the agricultural sector of Russia. *Agricultural machines and technologies*. 2013. N6. 22-25 (In Russian). EDN: RVTBIX.
2. Uspenskiy I.A., Rymbalovich G.K., Kostenko M.U., Beznozyuk R.V. Assessment of prospective technological schemes potato harvester. *Izvestia of the Lower Volga Agricultural University Complex*. 2018. N1 (49). 262-269 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2018-01-262-269.
3. Byshov N.V., Borychev S.N., Rembalovich G.K. et al. A mathematical model of the technological process of potato harvester at work on heavy loamy soil. *Herald of Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev*. 2014. N4 (24). 59-64 (In Russian).
4. Byshov N.V., Borychev S.N., Uspenskiy I.A., et al. Technological and theoretical basis of potato harvesters secondary separation parameters in a case of harsh conditions of harvesting. *Herald of Ryazan state agrotechnological university named after P.A. Kostychev*. 2012. N4. 87-90 (In Russian). EDN: PLVONF.

5. Bobryshov A.V., Likhanos V.A. Calculation of maximum dynamic loads in transmissions of machine and tractor units. *SWorld*. 2014. Vol. 4. N3. 24 (In Russian).
6. Korolev A.E. Reliability of potato harvesters. *NovaUm. Ru*. 2017. N10. 38-40 (In Russian). EDN: YNDSNI.
7. Ovchinnikova N.I., Bonnet V.V., Kosareva A.V. Technical condition diagnostics potato harvester drives and viruses. *Agrarian Scientific Journal*. 2021. N9. 95-97 (In Russian). DOI: 10.28983/asjy2021i9pp95-97.
8. Godzhaev Z.A., Sapyan Yu.N., Kolos V.A., Gorshkov M.I. Consumption and loss of fuels and lubricants in mobile agricultural machinery. *Agricultural Machines and Technologies*. 2017. N2. 9-14 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992017.2.914. EDN: YODAPN.
9. Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A., Mironova A.V. Main directions for increasing the resource wear-out working parts of agricultural machines. *Agricultural machines and technologies*. 2023. Vol. 17. N1. 41-50 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-1-41-50. EDN: IEUNKO.
10. Denisov V.A., Slavkina V.E., Alekhina R.A., Kasimov R.M. Increasing the durability of exterior parts of agricultural machinery using composite materials. *Technical Service of Machines*. 2023. Vol. 61. N4(153). 90-96 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2023-61-4-90-96.
11. Arola D., Williams C.L. Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces. *International Journal of fatigue*. 2002. Vol. 24. N9. 923-930 (In English). DOI: 10.1016/S0142-1123(02)00012-9.
12. Barsukov G.V., Kozhus O.G., Vinokurov A.Yu. Study of the abrasive ability of artificial and natural abrasives that ensure the productivity of waterjet cutting. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2018. N2. 34-40 (In Russian). EDN: UXZGMJ.
13. Lavrinenko V.I. Current advances in the development of abrasive tools and investigation of diamond abrasive machining processes (Materials science approach). *Review. Journal of Superhard Materials*. 2018. Vol. 40. 348-354 (In English). DOI: 10.3103/S1063457618050064.
14. Oteniy Ya.N., Nikiforov N.I., Zhuravlev A.I. Combined processing of long shafts. *STIN*. 2006. N6. 36-39 (In Russian).
15. Skovorodin V.Ya., Antipov A.V. The influence of finishing and antifriction treatment of shafts on the amplitude parameters of surface roughness. *Scientific support for the development of the agro-industrial complex in conditions of import substitution*. 2018. 387-391 (In Russian).
16. Nemenko A.V., Nikitin M.M. Product quality management in machining of metals by cutting. *Modern technologies: problems and prospects*. 2019. 117-120 (In Russian). EDN: TQCRLW.
17. Kobayashi H., Mark B., Turin W. Probability, Random Processes and Statistical Analysis. Cambridge University Press, 2012. 813 (In English).
18. Cappé O., Moulines E., Ryden T. Inference in hidden Markov models. Springer, 200.652 (In English).
19. Wang B., Zhao W., Du Ya. et al. Prediction of fatigue stress concentration factor using extreme learning machine. *Computational materials science*. 2016. Vol. 125. 136-145 (In English). DOI: 10.1016/j.commatsci.2016.08.035.
20. Syusyuka E.N. Possibility of applying X-ray methods to control the surface quality of a shaft line after finishing. *Journal of Physics: IOP Publishing*. 2021. Vol. 2061. N1. 012022 (In English). DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012022.
21. Ragavanantham S., Kumar S.S., Shyam M.S. Optimization of shutter speed in machine vision technique for monitoring grinding wheel loading. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 766. 878-883 (In English). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767:878-883.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Заявленный вклад соавторов:

Неменко А.В. – научное руководство;

Никитин М.М. – обработка данных.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Coauthors' contribution:

Nemenko A.V. – research supervision;

Nikitin M.M. – data processing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию

Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on

The paper was accepted for publication on

10.01.2024

01.03.2024