17. Оспанбаев Ж. Инновационные подходы устойчивого развития орошаемого земледелия Казахстана // Достижения и перспективы развития земледелия и растениеводства: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Алматы: ТОО «Асыл Кітап», 2019. – С. 372-382.

УДК 631.31:004.942

DOI: 10.26898/agroinfo-2021-16-22

Мяленко В.И.,

Кузбасская государственная сельскохозяйственная академия, г. Кемерово

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РАБОЧЕГО ОРГАНА ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКОГО ОРУДИЯ

Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель рабочего органа земледельческого орудия, позволяющую рассчитать и предвидеть ожидаемое его поведение в период всего срока эксплуатации. Целью настоящей работы являлась разработка цепочки последовательных моделей, составляющих цифровой двойник рабочего органа земледельческого орудия. В качестве первой составляющей цепочки моделей алгоритма цифрового двойника определили методом ускоренных имитационных нагружений рабочего органа клинорыхлителя, принятого в качестве объекта исследования. Вторую составляющую выявили методом тестирования различных почв с определением силовых эквивалентов. При описании последующих составляющих учитывали физико-механические свойства почв и материалы (упрочнения) для изготовления рабочих органов. В результате исследований было установлено, что алгоритм построения цифрового двойника рабочего органа земледельческого орудия сложен из цепочки последовательных действий и представляет систему цифрового описания рабочего органа, обеспечивающую нормативный срок службы при эксплуатации. В качестве первой составляющей алгоритма приняли результаты имитационного погружения, которые регистрируют характер распределения нормальных сил по поверхностям трения. Во второй составляющей учитывали результаты определения силового эквивалента при нагружении рабочего органа в условиях реальной почвенной среды. Выявили возможность построения карт интенсивностей абразивного износа поверхности трения, прогнозных расчетов элементов конструкции. Третью и четвертую составляющие использовали для обеспечения нормативного срока службы рабочего органа, исходя из минимальных затрат при изготовлении, соотнесенных к единице выработки нормативного ресурса. Таким образом, полученный алгоритм построения цифрового двойника – удобный инструмент при создании новых конструкций рабочих органов земледельческих орудий.

Ключевые слова: земледельческое орудие, цифровой двойник, имитационная модель, метод имитационных нагружений, динамический винт, номограмма определения ресурса работоспособности.

Введение. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель физического объекта, в данном случае рабочего органа земледельческого орудия, который воспроизводит его поведение в период реальной эксплуатации. Первоначальные характеристики и геометрические параметры рабочих органов постепенно изменяются в процессе эксплуатации земледельческих орудий вследствие абразивного износа или других причин, включая случаи поломок [1, 2]. Использование модели цифрового двойника позволяет предвидеть ожидаемое поведение рабочего органа в период эксплуатации и предотвратить возникновение критических ситуаций, не снижая качества выполнения технологического процесса за весь срок эксплуатации.

Для создания модели цифрового двойника необходимы достаточный опыт и данные о поведении рабочего органа в разных режимах реальной эксплуатации. К сожалению, это требует больших затрат времени наблюдения с учетом сезонности и технологического разнообразия работ, в результате которых объект уже морально устаревает и требует каких-то конструктивных изменений. Поэтому необходимы методы ускоренных процессов и имитаций, которые адекватно отражают реальные процессы и помогают создать электронный паспорт с уравнениями, табличными материалами и математическими моделями, характеризующими работу в реальных условиях [3]. В настоящее время это особенно актуально, когда периодически меняются технологии возделывания сельскохозяйственных культур и требуются надежные конструкции новых рабочих органов земледельческих орудий.

Цель исследования – разработать алгоритм последовательных моделей, составляющих цифровой двойник рабочего органа земледельческого орудия.

Материалы и методы. Целевая функция состоит из нескольких переменных, описывающих разные процессы, которые одновременно воздействуют на рабочий орган в процессе его эксплуатации. В ходе анализа оценивали оптимальные соотношения между переменными по конечному критерию – минимальным затратам на изготовление рабочего органа с обеспечением номинального ресурса работоспособности и качества выполнения технологического процесса [4].

Приборная база исследования включала стенд для ускоренных имитационных нагружений и устройства для пространственного динамометрирования рабочих органов в реальной среде эксплуатации. В качестве макетного образца опытного рабочего органа использовали клин-рыхлитель с лицевой поверхностью 120×120 мм. Абразивная среда представляла рыхлую почвенно-песчаную структуру с влажностью 20-25 %, а угол рыхления клина – 30°.

Первая составляющая двойника получена на основе метода имитационных нагружений рабочего органа с последующим построением эпюр нормальных давлений, действующих со стороны обрабатываемой почвы. Вторую составляющую выявили методом тестирования различных почв с нахождением силовых эквивалентов внешнего нагружения. Далее использовали составляющие, учитывающие физико-механические свойства почв зон последующей эксплуатации, и выбирали материалы (упрочнения) для изготовления рабочего органа, обеспечивающие нормативный срок службы и качество выполнения технологического процесса. В качестве объекта исследования приняли макетный образец клина-рыхлителя, прошедший этапы научно-исследовательских работ и агробиологической оценки.

Результаты и обсуждение. При нахождении эпюр нормальных давлений применяли метод имитационных ускоренных нагружений, поскольку в условиях реальной эксплуатации требуются длительные сроки наблюдений, вызванные сезонностью работ и сложностью соблюдения идентичности при необходимых повторностях. Принцип измерения нормальных давлений, действующих со стороны почвы на рабочий орган, в нашей работе был основан на практическом применении закона Амонтона-Кулона, где интенсивность трения и, как следствие, абразивного износа пропорциональна нормальному давлению [5]. Предварительно изучили разные методы измерения, в частности метод искусственных баз и методы нанесения на поверхности трения легкоистираемых материалов покрытий – гальванических разных цветов или лакокрасочных [6]. В настоящей работе применяли имитационный метод (рисунок 1).

Рисунок 1. Стенд для ускоренных имитационных испытаний рабочих органов земледельческих орудий на абразивный износ: *а* – схема нагружения рабочего органа;

в – магнитоиндукционный измеритель толщины слоя легкоистираемого материала;

с – общий вид стенда;

1 – круговая камера; 2 – почвенно-песчаная среда; 3 – стойка; 4 – рабочий орган;

5 – легкоистираемый материал; 6 – магнитоиндукционный прибор; 7 – сердечник;

8 – катушка; 9 – кондуктор

Внутри круговой камеры, заполненной почвенно-песчаной средой, находится стойка с рабочим органом. На поверхность трения рабочего органа нанесен легкоистираемый материал, толщина слоя которого измерялась магнитоиндукционным прибором с сердечником и катушкой с ориентированием по кондуктору. Значения величин нормальных давлений определяли, ориентируясь на закон Амонтона-Кулона:

$$N = \frac{\Delta H}{\operatorname{tg} \varphi \cdot K_c}; \quad (1)$$

где: N – нормальное давление, H ;

ΔH – точечная величина измеренного износа на поверхности трения рабочего органа, $мм$;

φ – угол трения, $рад$;

K_c – коэффициент сопротивляемости абразивному износу.

Полученные в разных точках длины L лицевой поверхности рабочего органа значения нормальных давлений N откладывали в масштабе на тех же точках с получением эпюры, описывающей $N = f(L)$. Для удобства дальнейшего обсуждения эпюру разместили в координатной плоскости XOY (рисунок 2).

Рисунок 2. Эпюра нормальных давлений, действующая по поверхности трения клина-рыхлителя:

1 – рабочий орган; 2 – верхняя граница эпюры

Граница эпюры характеризует распределение нормального давления по всей длине поверхности трения и может быть описана следующим уравнением:

$$y = -0,0008x^4 + 0,043x^3 - 0,838x^2 + 7,232x - 20,608. \quad (2)$$

Судя по характеру распределения нормальных давлений, интервал эпюры от a до b более нагружен в сравнении с интервалом от b до c (рисунок 2). Вместе с тем вся площадь эпюры нормальных давлений по своему физическому смыслу представляет суммарную величину внешнего нагружения (давления), испытываемого рабочим органом. При этом площадь эпюры давления определяется исходя из уравнения:

$$S = \int_{20}^{180} f(x)dx - \Delta S' = \int_{20}^{180} (-0,0008x^4 + 0,043x^3 - 0,838x^2 + 7,232x - 20,608)dx - \Delta S' = 442,7 \text{ мм}^2, \quad (3)$$

где S – площадь эпюры, $мм^2$;

$\Delta S'$ – площадь с отсутствием давления в пределах интервала интегрирования, $мм^2$.

Полученные зависимости (2) и (3) позволяют судить о характере изменения внешнего нагружения по поверхности трения, хотя реальные значения действующих нагрузок в конкретных средах эксплуатации орудий остаются неизвестными.

Вторую составляющую цифрового двойника нашли методом нагружения рабочего органа в условиях реального почвенного сложения (тестирование почв). С этой целью применили устройство для пространственного динамометрирования рабочих органов земледельческих орудий (рисунок 3).

Рисунок 3. Схема устройства для пространственного динамометрирования рабочего органа:
1-6 – тензометрические звенья; 7 – кронштейны; 8 – рабочий орган

Тензометрические звенья воспринимают пространственные силовые характеристики, действующие на рабочий орган со стороны почвы [8]. Расчетная схема определения силового эквивалента представляет собой следующую последовательность:

$$\begin{aligned}
 P_x &= \sum_{i=1}^6 P_{xi} = P_1 - P_2; \\
 P_y &= \sum_{i=1}^6 P_{yi} = P_3 + P_4 - P_5; \\
 P_z &= \sum_{i=1}^6 P_{zi} = P_6; \\
 M_x &= \sum_{i=1}^6 M_{xi} = P_6 \cdot h_{x6} - P_3 \cdot h_{x3} - P_4 \cdot h_{x4} + P_5 \cdot h_{x5}; \\
 M_y &= \sum_{i=1}^6 M_{yi} = P_3 \cdot h_{y3} - P_2 \cdot h_{y2} - P_6 \cdot h_{y6}; \\
 M_z &= \sum_{i=1}^6 M_{zi} = P_2 \cdot h_{z2} + P_3 \cdot h_{z3} - P_1 \cdot h_{z1} + P_4 \cdot h_{z4} - P_5 \cdot h_{z5};
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $P_1, P_2, \dots, P_6$ – усилия, регистрируемые в соответствующих тензометрических звеньях, Н;

h_{x1}, h_{y2}, h_{z3} и т. д. – плечи направления усилий относительно осей координат, м;

$P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z$ – проекции главного вектора P и главного момента M , Н, Н·м.

Силовым эквивалентом являются главный вектор P и главный момент M , определяемые из системы уравнений (4). Для расчета центра давления на рабочий орган со стороны почвы

(точка n) используем уравненные оси динамического винта и уравнение поверхности рабочего органа:

$$\begin{cases} \frac{M_x - (y \cdot P_z - z \cdot P_y)}{P_x} = \frac{M_y - (z \cdot P_x - x \cdot P_z)}{P_y} = \frac{M_z - (x \cdot P_y - y \cdot P_x)}{P_z}; \\ y = a + bx + cz. \end{cases} \quad (5)$$

где x, y, z – текущие координаты;

a, b, c – постоянные уравнения поверхности рабочего органа.

Решение систем уравнений (5) позволяет определить координаты точки пересечения оси динамического винта с поверхностью рабочего органа (точка n). Возвращаясь к эпюре нормальных давлений (рисунок 2), показывающей характер распределения нормальных давлений по лицевой поверхности рабочего органа при имитационном нагружении, и имея величины силового эквивалента, полученного в условиях реального нагружения, нетрудно установить величины реальных удельных давлений, ожидаемые в последующей практике эксплуатации рабочего органа:

$$\lambda = \frac{P}{S}; \quad (6)$$

где P – главный вектор, Н;

λ – удельное давление, Н/мм².

В зависимости (6) силовой эквивалент представлен только главным вектором P . Значения главного момента M здесь можно не учитывать, считая незначительным его влияние на величины нормальных давлений.

Например, полученная величина главного вектора в одном из наших измерений $P = 872$ Н. Согласно зависимости (3) при площади эпюры $S = 442,7$ мм² величина реального удельного давления определяется как $\lambda = 1,97$ Н/мм² (рисунок 2).

Таким образом, сочетание имитационного моделирования и реального определения силового эквивалента дает возможность проведения прочностных расчетов конструкции рабочего органа по координатам центра давления, а также прогнозировать интенсивность абразивного изнашивания поверхности трения с построением карт абразивного износа (рисунок 4).

Рисунок 4. Карта абразивного износа поверхности трения клина-рыхлителя: a – эпюра интенсивностей износа; b – упрочнение износостойким материалом; $Z_{\max}$, $Z_{\min}$ – толщина слоя упрочнения

В зависимости от нормативных требований к срокам службы рабочего органа карта износа позволяет дифференцировать толщину нанесения наплавочного материала.

Следующие две составляющие алгоритма цифрового двойника нацелены на выбор исходных материалов для изготовления рабочего органа и учета условий и свойств почв, где предполагается последующая эксплуатация сельскохозяйственного орудия. В конечном счете, обеспечивается нормативный срок службы рабочего органа при неизменном качестве выполнения технологического процесса. Задача обеих составляющих заключается в обеспечении нормативного срока службы и решается путем выбора целесообразного соотношения между сортаментом материалов для изготовления (упрочнения поверхности трения) рабочего органа и учета абразивных свойств почвы зоны предполагаемой эксплуатации. При этом целесообразность выбора решения оценивается в нахождении минимального значения в соотношении суммы всех затрат на изготовление к единице нормативного срока службы рабочего органа.

Сегодня все почвы по изнашивающей способности можно разделить на три условных категории: первая – 1,3-3,0 г/га, вторая – 0,5-1,3 г/га, третья – 0,37-0,65 г/га применительно к стали Л 55 [8]. В то же время разные материалы, применяемые для изготовления поверхностей трения рабочих органов сельскохозяйственных орудий, также имеют разную относительную износостойкость. Принимая в качестве эталона сталь Л 53 за единицу, ко второй группе материалов можно отнести сплавы структуры аустенит + мартенсит и белый чугун – 2,5-3,5, а в третью группу войдут наплавочные материалы типа сормайт – 5,5 [9, 10]

Тогда последовательность выбора целесообразного материала для противостояния поверхности трения удобно проследить по формализованной номограмме (рисунок 5).

Рисунок 5. Формализованная номограмма выбора свойств почв и материалов рабочего органа:

T – время (продолжительность) истирания поверхности трения рабочего органа (сталь Л 55); ΔG – точечный вынос металла с поверхности трения; R, R_n – эксплуатационный и нормативный ресурс; I половина – 1, 2, 3 – почвы с различной изнашивающей способностью; II половина – 1, 2, 3 – группы материалов с различной относительной износостойкостью

На рисунке 5 в первой половине координатных осей номограммы сплошными линиями изображены лучи, характеризующие почвы с различной изнашивающей способностью, а во второй – материалы с различной относительной износостойкостью. Штриховыми ли-

ниями обозначен маршрут – ключ, начиная от учета свойств почв к выбору материалов, обеспечивающих нормативный ресурс.

Выводы. Алгоритм построения цифрового двойника рабочего органа земледельческого орудия сложен из цепочки последовательных действий и представляет систему цифрового описания рабочего органа, обеспечивающую нормативный срок службы при эксплуатации. В качестве первой составляющей алгоритма приняты результаты имитационного погружения, которые регистрируют характер распределения нормальных сил по поверхностям трения. Второй составляющей стали результаты определения силового эквивалента при нагружении рабочего органа в условиях реальной почвенной среды. Сочетание этих двух составляющих обеспечивает возможность построения карт интенсивностей абразивного износа поверхности трения. Кроме этого, можно найти центр внешнего давления на рабочий орган и провести прогнозные расчеты элементов конструкции.

Третья и четвертая составляющие нацелены на обеспечение нормативного срока службы рабочего органа, исходя из минимальных затрат при изготовлении, соотнесенных к единице выработки нормативного ресурса. Полученный алгоритм построения цифрового двойника – удобный инструмент при создании новых конструкций рабочих органов земледельческих орудий. Модели, составляющие алгоритма, могут быть усовершенствованы, усложнены и расширены для более адекватного отражения процесса движения рабочего органа в обрабатываемой среде.

Использованные источники:

1. Панов И.М., Ветохин В.И. Физические основы механики почв. – Киев: Феникс. 2008. – 266 с.
2. Сиркус Р., Янкаускас В., Гайдис Р. Моделирование рабочих контактных нагрузок почвообрабатывающего элемента // Трение и износ. 2016. – Т. 37. – №4. – С. 510-515.
3. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузмишина А.М. Разработка цифрового двойника режущего инструмента для механообрабатывающего производства // Тенденции развития науки и образования. 2018. – №45. – С. 50-57.
4. Синягов С.А., Куприяновский В.П., Куренков П.В., Намиот Д.Е., Степаненко А.В., Бубнов П.М., Распопов В.В., Селезнев С.П., Куприяновская Ю.В. Строительство и инженерия на основе стандартов BIM как основа трансформаций инфраструктур в цифровой экономике // International journal of open information technologies. 2017. – Т.5. – №5. – С. 46-79.
5. Кузнецова С.В. Преимущества применения технологии «цифровых двойников» в зарубежном и отечественном производстве // Проблемы экономики, финансов и управления производством. 2019. – №45. – С. 49-57.
6. Хрущев М.М., Бабичев М.Д. Абразивное изнашивание. – М.: Наука. 1970. – 252 с.
7. Мясенко В.И. Карта абразивного износа поверхности трения почворежущей детали // Трение и износ. 2020. – Т. 41. – №1. – С. 128-132.
8. Мясенко В.И., Маринов Н.А. Пространственное динамометрирование рабочих органов почвообрабатывающих орудий // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. – №5. – С. 22-26.
9. Севернев М.М., Подлекарев Н.Н., Сохадзе В.Ш., Китиков В.О. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин. – Минск: Беларуская Навука. 2011. – 334 с.
10. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А. Основы трибологии (трение, износ, смазка). – М.: Машиностроение. 2001. – 664 с.

УДК 631.15

DOI: 10.26898/agroinfo-2021-22-25

*Шпедт А.А., Злотникова В.В.,
Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр
Сибирского отделения Российской академии наук»*

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АПК КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

В статье рассматривается значимость применения информационно-цифровых технологий в АПК, освещается государственная поддержка внедрения информационных систем в АПК, дается краткая характеристика