

Анализ эффективности и построение обобщенных алгоритмов адаптации подповерхностного фрезерователя

В.П. Максимов

ФГБОУ ВПО Новочеркасская государственная мелиоративная академия, г. Новочеркасск

На сельскохозяйственных землях Северо-Кавказского региона распространены низкоплодородные солонцовые почвы общим объемом более чем 4,2 миллиона гектаров. При этом около 1,7 млн. га приходится на Ростовскую область. На этих площадях солонцы находятся чаще всего в виде небольших пятен и, занимая лишь относительно небольшую часть территории, резко снижают плодородие всех почв комплекса. Вовлечение этих земель в интенсивный хозяйственный оборот и, особенно в условиях орошаемого земледелия нерационально и неэффективно без проведения мелиоративных мероприятий по повышению их плодородия.

Одним из направлений повышения плодородия солонцов и солонцовых почв является глубокая мелиоративная обработка, обеспечивающая их рассолонцевание за счёт вовлечения в разрыхляемый слой гипсовых отложений из подпахотных горизонтов почвенного профиля, образуя в результате окультуренный пахотный и корнеобитаемый слой без вносимых извне химических мелиорантов. После такой обработки значительно увеличивается урожайность, как сеяных трав, так и зерновых культур. Определяющим условием (требованием), обеспечивающим эффективность данного приёма (способа) и технологии рассолонцевания, является тщательное крошение и перемешивание солонцового и карбонатного почвенных горизонтов.

Указанное условие (требование) обеспечивается применением при обработке солонцов и солонцовых почв соответствующих конструкций почвообрабатывающих орудий и технологий.

Однако существующие орудия и технологии не удовлетворяют в полной мере требованиям по важнейшим агротехническим, экономическим и экологическим показателям. Поэтому известные конструктивные решения таких орудий нуждаются в дальнейшем совершенствовании, а технологии обработки таких почв в дальнейшей оптимизации.

Проектированию орудия для глубокой мелиоративной обработки солонцов и солонцовых почв предшествовала разработка агротехнических требований, основные положения которых следующие.

1. При мелиоративной механической обработке солонцов и солонцовых почв необходимо максимально сохранить плодородие и состояние верхнего гумусового слоя и покрывающей его растительности, а свойства нижних подстилающих горизонтов изменить внедрением почвообрабатывающего орудия в подсолонцовый горизонт на глубину, обеспечивающую вовлечение достаточного для рассолонцовывающей обменной реакции количества солей кальция.

2. Для рассолонцевания и повышения плодородия солонцов и солонцовых почв глубокой мелиоративной вспашкой и созданием оптимальных условий для реакции замещения ионов натрия ионами кальция необходимо:

- обеспечить крошение и перемешивание почв солонцового и карбонатных горизонтов без коренного нарушения поверхностного гумусового слоя;
- в процессе механического воздействия сформировать возможно бóльшую площадь взаимного контакта между взаимодействующими реагентами (солями натрия и калия) в почвенном поглощающем комплексе;
- обеспечить условия для проникновения влаги (увлажнения почвы) по всей глубине и объёму обрабатываемого почвенного пространства.

С учётом этого определены агротехнические требования, суть которых заключается в следующем: максимальная сохранность гумусового слоя при степени дробления

солонцового и карбонатного горизонтов не менее 70 %; качество перемешивания перемешиваемых слоёв почвы не менее 80 %; содержание пылевидной фракции в почве не более 10 % и выносе солонцового горизонта на поверхность менее 15 %.

3. Условия проведения работ – средняя влажность почвы в обрабатываемом слое на уровне 18...23 % при температуре почвенной массы – 5...15⁰ С.

4. Условие адаптивности орудия – обеспечение возможности оптимизации контактной поверхности натриевых и карбонатных реагентов при обеспечении высокого уровня влагопроницаемости разрыхляемого слоя почвы – достигается соответствующим изменением режимов работы почвообрабатывающего орудия.

С учетом вышеприведенных требований разработана конструкция подпокровного фрезерователя (ПФ) где основные операции по дроблению и перемешиванию солонцового и карбонатного горизонтов выполняют работающие под покровом (гумусовым горизонтом) два встречно вращающихся фрезбарабана [1].

Решение задач инновационного проектирования ПФ предполагает подбор соотношений между геометрическими, кинематическими, силовыми и динамическими параметрами рабочих органов, при которых движение агрегата наилучшим образом соответствует требуемым условиям ведения процесса обработки почвы. Однако свойства почвы широко варьируются даже в пределах одного участка. В этой связи на первый план выдвигается проблема гибкости, приспособляемости конструкции рабочих органов требованиям технологического процесса, связанным с постоянным изменением состояния технологического объекта. Выполнение требуемых функций приспособления обеспечивается системой автоматического управления (САУ), осуществляющей перестройку закона движения рабочих органов в зависимости от состояний технологического процесса и внешних условий.

Известно, что состояние объекта характеризуется совокупностью текущих значений его атрибутов и связей. Полное пространство может представлять собой неопределенное, хотя конечное множество возможных (но не всегда ожидаемых или желанных) состояний [2]. Взаимодействие объектов во время работы системы приводит к изменению их состояний. Иницирует переход в следующее состояние событие. Таким образом, работа системы характеризуется последовательностью происходящих в ней событий.

Динамику системы исследуем с помощью *диаграммы состояний* (ДС). Она показывает пространство *состояний* данного класса, как множество его состояний $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$; множество *событий* $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, которые влекут переход из одного состояния в другое; *действия* D , которые происходят при изменении состояния; и множество *переходов* $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ [3].

Рассмотрим основные особенности функционирования ПФ. Проблема эффективности его работы заключается в выборе способов действий, удовлетворяющим целевым функциям или критериям. Известны оценки качества мелиорации солонцовых почв, основанные на физико-химических методах анализа достаточно точны, интегральны и информационно насыщены, но, как отмечалось выше, не репродуктивны. Исследуемый объект – подпокровный фрезерователь с механическим воздействием на почву требует критерий с оперативными характеристическими функциями, адекватно отражающими качество мелиорации.

Возможны два подхода для решения этой задачи.

Первый основан на критериально-энергетическом анализе. Для этого выделим потоки энергии основных процессов: W_1 – резание; W_2 – перемещение ходовой части; W_3, W_5 – перенос и перемешивание, а так же потоки энергии процессов опосредованных: W_4 – выталкивание смеси; W_7 – вторичное дробление в результате работы транспортирующего канала и W_6 – эффекты взаимодействия механических органов, как затратный результат связи нелинейных процессов между ними. Энергия W_7 характеризует

структурную устойчивость агрегата относительно совокупности воздействий (сопротивлений) почвы.

Каждая из указанных энергий, моделируемая сложными функционалами содержит в общем виде аналитические модели следующих конструкций;

$$\begin{aligned}
 W_1 &= F_1 \{k_{1,2}, \Gamma_n, q_{рез}\}; \\
 W_2 &= F_2 \{V, q_{см}, q_{разр}, \Gamma_{агр}, f_{соб}, f_{вын}\}; \\
 W_3 &= F_3 \{\omega_{1,2}^2, h, \Gamma_n, \Gamma_{агр}, \Delta\omega, q_{смещ}\}; \\
 W_4 &= F_4 \{h_r, V_{пот}, q_{смеш}, k_p\}; \\
 W_5 &= F_5 \{q_{смеш}, \Delta\bar{\omega}, \Gamma_{ио}, (D_1/D_2), a, T_\phi\}; \\
 W_6 &= F_6 \{\Delta f, \Xi_n, [f(\Delta\bar{\omega})], \Gamma_n, \Gamma_{агр}, \Gamma_{ио}\}; \\
 W_7 &= F_7 \{q_{сц}, q_{сж}, \Delta\bar{\omega}, q_{дроб}, \Gamma_n\};
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $k_{1,2} = V/\omega_{1,2}$ – удельная подача фрез;

$\Gamma_n, \Gamma_{агр}, \Gamma_{ио}$ – геометрические параметры определяющие режимы работы ножей фрез, агрегата и исполнительного органа;

$q_{рез}, q_{см}, q_{разр}, q_{смеш}, q_{сц}, q_{сж}$ – удельные сопротивления резания, смятия, разрушения, смещения, сцепления и сжатия почвы при выполнении фрезером функциональных операций;

$V, \omega_{1,2}, V_{пот}, \Delta\bar{\omega}$ – скорость подачи, частота вращения фрез, скорость потока почвы, разность частот вращения фрез, приведенная к поступательной скорости потока разрушенного слоя;

$f_{соб}, f_{вын}, \Delta f$ – частоты собственно механизмов, вынужденные, обусловленные взаимодействием фрезеромателя с почвой и частоты вибрационных процессов ПФ;

h, h_r – высота фрезеруемых слоев и гумуса;

$k_p, k_{дроб}$ – коэффициенты разрыхления и дробления;

a, D_1, D_2 – расстояние между фрезами и их диаметры;

Ξ_n – обобщенная и приведенная эпюра силовых воздействий в агрегате, как комплексная характеристика силового поля в механизмах;

T_ϕ – оценка турбулентности потока между фрезами;

F_i – соответствующие функционалы.

Качество обработки почвы, с точки зрения эффективности процессов мелиорации, определяют энергии W_1, W_3, W_5, W_7 . Энергии W_2, W_4, W_6 обеспечивают основные процессы. Поэтому одним из критериев качества будет отношение

$$k_{r1} = (\sum_{i=1,3,5,7} W_i / \sum_{i=1}^7 W_i) \rightarrow \max. \tag{2}$$

Если связать энергию с производительностью ПФ, то справедлив критерий минимальных удельных энергозатрат

$$k_{r2} = (\sum_{i=1}^7 W_i / V) \rightarrow \min, \tag{3}$$

характеризующий максимальную производительность в начале зоны насыщения кривой $V = f(\vartheta)$, где ϑ – объем потока почвы.

Процедуры оптимизации по (2) и (3) при полноте моделей (1) дают возможность параметрического синтеза оптимальных геометрических параметров ПФ. Оператор будет формировать при этом оптимальные управляющие воздействия $V = V_{opt}$ и $\omega_{1,2} = \omega_{1,2 opt}$. Такую информацию оператору могут дать кривые оптимального компаундирования, полученные теоретически для разных свойств почв. Однако использовать в оперативном управлении ПФ критерий (2) весьма сложно, так как совокупность свойств почв (возмущающих факторов) не определима. Кроме того, в понятие эффективности входят и показатели качества мелиоративной обработки, такие как дисперсный состав дробления, глубина рыхления и степень перемешивания генетических горизонтов (структурно-фракционный состав).

Условное разделение энергий дает логико-аналитическую основу для поиска иных путей, идентифицирующих косвенно критерии эффективности. Так при непрерывном движении ПФ и наличие не жесткой сцепки с тяговым агрегатом процессы формирования тягового усилия будут иметь колебательный характер. Примем первую гипотезу, что частота и амплитуда колебаний (при наличии фильтрации собственных частот агрегата) характеризует процессы разрушения карбонатных включений. Вторая гипотеза определена понятием эпюры силового взаимодействия рабочих органов ПФ. Нелинейность получаемых процессов формируется остаточным энергетическим принципом в виде

$$\widetilde{W}_7 = W_A - (W_{xч} + W_{ио}), \quad (4)$$

где $W_A, W_{xч}, W_{ио}$ – энергии, измеряемые на двигателе (агрегате), ходовой части и исполнительном органе информационно-вычислительной системой. Из (1) и (4) при совместном решении можно найти в неявно выраженной форме определитель (индикатор) свойств переработанной почвы (косвенная оценка). Назовем его показателем свойств почвы, включающим мультипликативные связи $k_{дроб}, q_{сц}, q_{сж}$ и введем его в критериальную оценку k_{r3} .

$$\widetilde{W}_7 = \{k_{дроб} \cdot q_{сц}^3 \cdot q_{сж}^2 \cdot k_{п}\} \cdot f(\Delta\bar{\omega}, \Gamma_{н}) = k_{r3} \cdot f(\Delta\bar{\omega}, \Gamma_{н}), \quad (5)$$

где $k_{п}$ – коэффициент потерь энергетических процессов;

k_{r3} – есть нелинейный функционал, численно имеющий тенденцию роста/убыванию при снижении/возрастании составляющих эффективности работы ПФ;

$f(\Delta\bar{\omega}, \Gamma_{н})$ – известная функция, определяемая из решений (1-3).

Тогда критерий качества примет вид

$$k_{r3} = [\widetilde{W}_7 / f(\Delta\bar{\omega}, \Gamma_{н})] \rightarrow \min \quad (6)$$

Определяющими (системоформирующими) факторами в (6) могут быть режимные параметры $\omega_{1,2}, V, h$, которые при наличии конструктивных средств управления (СУ) могут изменяться с целью выполнения критерия (6). Но этот способ без коррекции по эффектам силового взаимодействия между элементами ПФ не дает эффективного управления режимом работы. Рассмотрим соотношение W_6 и W_7 .

Анализ причинно-следственных связей показывает, что нелинейность между энергетическими затратами органов ПФ и его структурной устойчивостью являются разными следствиями одной причины, которые распределяются на разные элементы системы – среду и сам объект. Гипотетически W_6 и W_7 должны быть пропорциональны и косвенно характеризовать обобщенный показатель $\Xi_{п}$. Следовательно отношение энергий W_6 и W_7 можно назвать коэффициентом взаимосвязи, оцениваемый косвенно через $\Xi_{п}$ и устанавливающий связь между энергиями. В области эффективной работы объекта справедливы соотношения $(W_{ио}/W_{xч}) = k_{вз}$ и $W_7 = W_6 \cdot k_{вз}$ (7)

Из (7) решается задача нахождения W_6 . Тогда по математической модели (1) можно найти

$$\Xi_{п} = F_9 \{ \widetilde{W}_7, W_{xч}, W_{ио}, \Delta f, [f(\Delta\bar{\omega})], \Gamma_{н}, \Gamma_{агр}, \Gamma_{ио} \} \quad (8)$$

и теоретическое значение порогового коэффициента $[k_{вз}]$.

Решение (8) имеет смысл для подтверждения второй гипотезы, хотя для оперативного управления ПФ достаточно знать $[k_{вз}]$ и тенденцию его изменения.

Таким образом получается дополнительный корректирующий критерий (КУ), усиливающий эффективность оценки режима работы ПФ

$$k_{r4} = k_{вз} - [k_{вз}] \rightarrow \min.$$

Величину k_{r4} можно определять через косвенные оценки режима работы ПФ, таких как разностное поле вибраций агрегата или через оценки авто и взаимно спектральных плотностей процессов – ρ_x и ρ_{xy} . Для таких измерений необходимо иметь не менее двух акселерометров с последующей обработкой их данных избирательными фильтрами и бортовым компьютером. Машинистом-оператором через средства управления (СУ) или автоматическим управляющим устройством (УУ) может быть реализован многокритериальный подход к решению задачи эффективного управления режимом работы ПФ.

Второй подход основан на разработанном и апробированном [4] способе непрерывного определения качества перемешивания и является более удобным и точным. Этот способ, дополненный анализом сило-моментных характеристик, служит основой для разработки функционала качества системы автоматического управления. Применение предложенных функционалов возможно для объектов (ПФ) с расширенными возможностями и исчерпывающим составом исполнительных органов (см. рис.). Анализ влияния режимных и геометрических параметров на качество обработки почвы показывает, что получить приемлемый результат при имеющемся разнообразии состояний почвы, возможно только при многоуровневом управлении кинематическими и геометрическими параметрами рабочих органов. Поскольку оперативное изменение геометрических параметров в процессе работы довольно сложная технически и дорогостоящая операция, то предлагается на последнем уровне управления осуществлять переход в состояние, характеризующееся новыми геометрическими параметрами рабочих органов, путем замены после остановки агрегата.

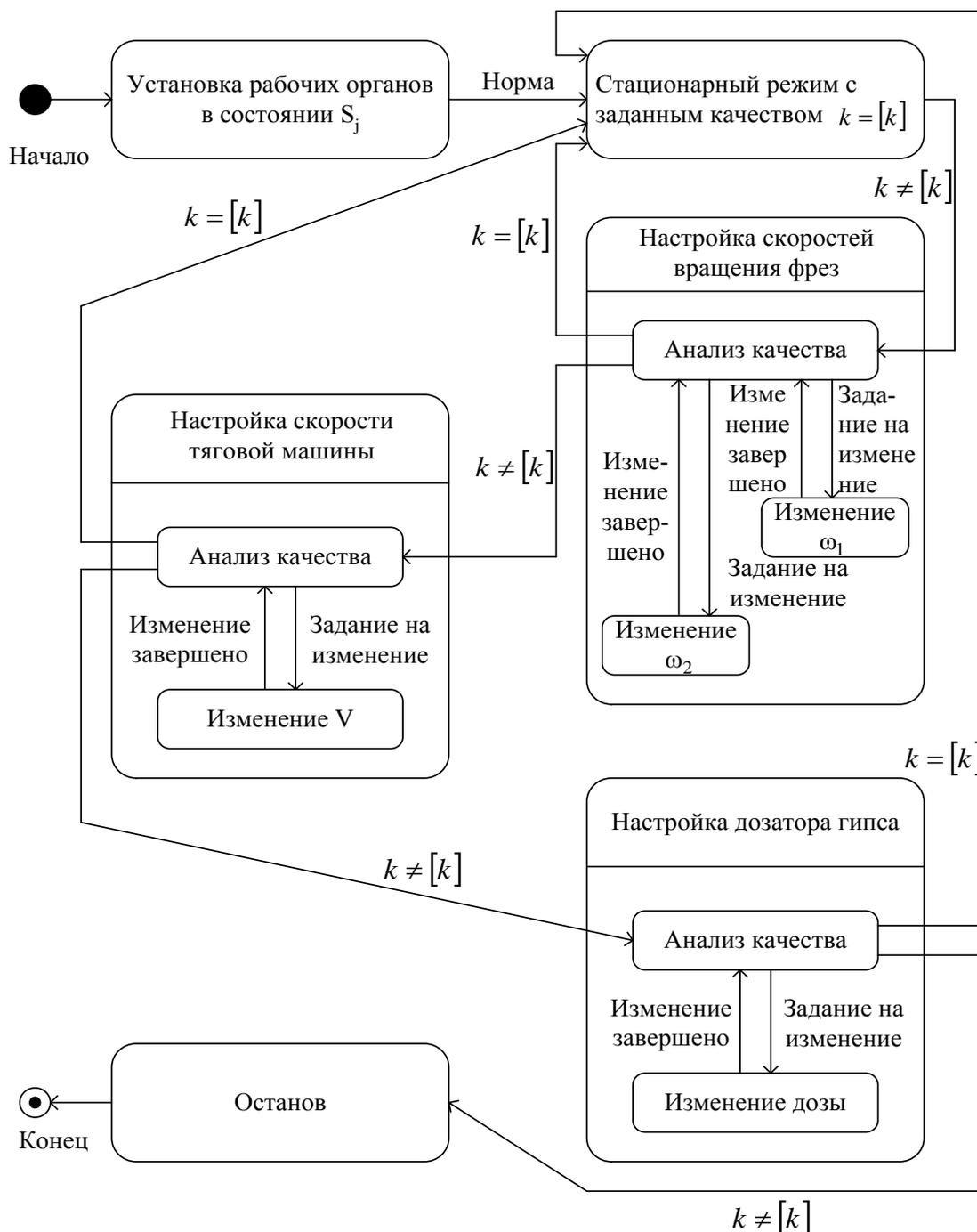


Рис. Диаграмма состояний ПФ

Первый уровень управления осуществляет настройку скоростей вращения фрез – ω_1 и ω_2 . Это определяет необходимость двухъярусной, самостоятельной для каждого обрабатываемого слоя, кинематики фрез. Второй уровень управления производит в соответствии с ω_1 и ω_2 настройку скорости передвижения тяговой машины – V . Это возможно на тракторах с автоматической бесступенчатой трансмиссией. Третий уровень управления – корректирует качество путем внесения добавочных доз гипса. Если после этого требуемый уровень качества обработки – $[k]$ достигнуть не удастся, то производится соответствующая замена рабочих органов (четвертый уровень управления).

Диаграмма состояний, формализующая вышеперечисленные режимы функционирования ПА приведена на рисунке. Совокупность текущих состояний диаграммы ДС описывает множество событий $W = \{\text{Начало; Норма } (k = [k]); \text{Сбой } (k \neq [k]); \text{Задания на изменения } \omega_1, \omega_2, V, \text{ ДГ; Завершение изменений; Останов}\}$;

множество состояний $S = \{\text{Установка рабочих органов; Стационарный режим; Настройка скоростей вращения фрез; Анализ качества; Изменение } \omega_1; \text{Изменение } \omega_2; \text{Изменение } V; \text{Изменение ДГ}\}$; множество действий $D = \{\text{Проверка условия } k = [k]; \text{Выдача сигналов на изменение } \omega_1, \omega_2, V, \text{ДГ}; \text{Выдача сигналов на завершение изменения } \omega_1, \omega_2, V, \text{ДГ}\}$; множество переходов R , где условиями переходов является несоответствие (соответствие) текущего значения k его требуемому значению $[k]$.

Проведенный анализ процесса функционирования ПА позволил получить пространство его дискретных состояний и описать траектории переходов состояний в соответствии с событием, отражающим изменение качества, что необходимо и достаточно для реализации управления ПФ в автоматическом режиме.

Литература:

1. Максимов В.П. Методология концептуального конструирования подпокровного агрегата // II съезд инженеров Дона: сборник докладов. – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВПО РГУПС. 2011
2. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: Учеб. для студентов вузов: Изд. 2-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999
3. Рамбо Дж., Якобсон Л., Буч Г. UML: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002
4. Максимов В.П. Оценка качества перемешивания генетических горизонтов при мелиорировании солонцовых почв // Ресурсосберегающие, экологически безопасные технологии мелиорации, рекультивации и охраны земель: Матер. межд. научн.-практ. конф. – Новочеркасск. 2004