

УДК 621.43

УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

И.П. Добролюбов

*Новосибирский государственный аграрный университет
Россия, 630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160*

Г.Л. Утенков

*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий,
Сибирский научно – исследовательский институт земледелия и химизации
Россия, 630501, Новосибирская обл., р.п. Краснообск
E-mail: utenkov1951@mail.ru*

Ключевые слова: почва, энергоёмкость, нестационарность технологического процесса, машинно-тракторный агрегат, скоростной и нагрузочный режим, зона позиционирования, система автоматического управления.

Аннотация: Обработка почвы является энергоёмким технологическим процессом при возделывании зерновых культур. Приведено описание разработанной системы автоматического управления с программным позиционным управлением скоростным и нагрузочным режимами (САУР) энергонасыщенных машинно-тракторных агрегатов (МТА) с гидрофицированной коробкой передач трактора и форсированным газотурбонаддувом двигателем внутреннего сгорания. САУР содержит три независимых контура управления: топливоподачей, переключением передач, положением рабочих органов сельхозмашин, обеспечивающих нахождение в зоне позиционирования на скоростной статической характеристике двигателя с учетом погрешностей измерения скорости и параметра нагрузки. Управление МТА подтверждает эффективность системы точного земледелия.

1. Введение

При выполнении энергоёмких технологических операций важно обеспечить максимально возможную производительность и топливную экономичность машинно-тракторных агрегатов (МТА) с сохранением высокого качества работ. При этом используются энергонасыщенные МТА с гидрофицированной коробкой передач трактора и форсированным двигателем внутреннего сгорания (ДВС с газотурбонаддувом). Встроенные информирующие системы о текущих энергетических (скоростном и нагрузочном) режимах малоэффективны из-за того, что тяговое сопротивление МТА изменяется случайным образом, по проходу агрегата может измениться в полтора - два раза и требуемое число воздействий на органы управления возрастет на 70-90%, что резко снижает реакцию тракториста на поступающие команды. Из-за значительной переменности тягового сопротивления МТА обеспечить экстремальное автоматическое управ-

ление энергетическими режимами затруднительно. Алгоритмы управления МТА с учетом структуры почвы изложены в работах [1,2] и обобщены в работе [3].

Цель исследований – обосновать алгоритмы и структуру системы управления механизированными технологическими процессами возделывания зерновых культур.

2. Основной текст

Разработанная система автоматического управления режимами (САУР) относится к классу автоматических адаптивных систем с программным позиционным управлением на входе и обеспечивает нахождение МТА в оптимальной зоне энергетических режимов (рис. 1). Критерием качества системы позиционного управления является минимум динамической ошибки позиционирования, мерой которой может служить расстояние между фактическим и программным положением объекта управления, определяемое метрикой махаланобисского типа, в частности хеммингова расстояния.

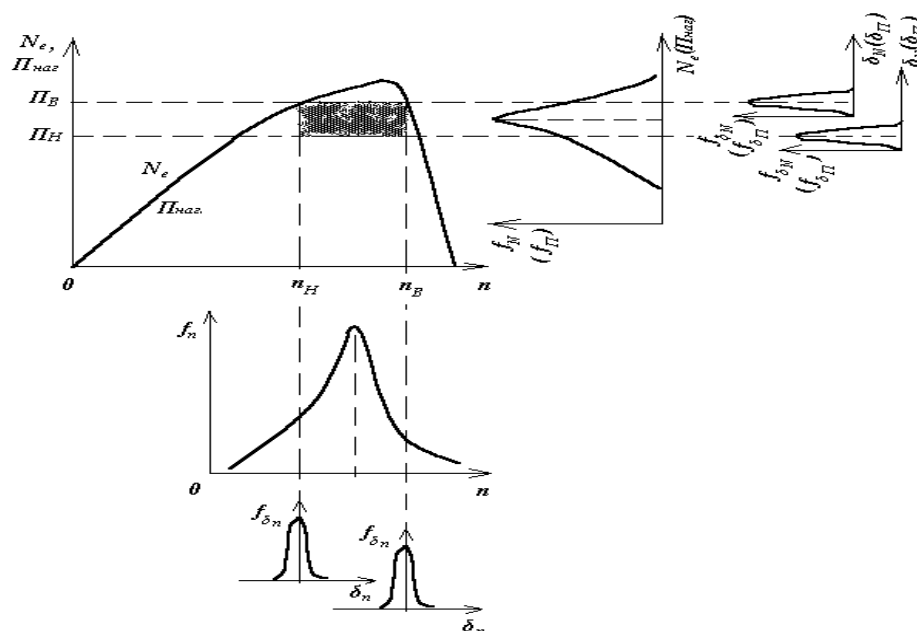


Рис. 1. Зона позиционирования на скоростной статической характеристике ДВС и плотности распределения вероятностей процессов (n – частота вращения коленчатого вала, т.е. среднее значение угловой скорости за период оборота).

В разработанной САУР управление режимами работы МТА на входе осуществляется путем силового и кинематического управления режимами работы двигателя. Управление проще всего реализуется на тракторах с гидрофицированной коробкой передач, двигатель которых форсирован газотурбонаддувом. В этом случае можно воздействовать непосредственно на рейку топливного насоса или рычаг управления топливоподачей, на рычаг переключения скоростей коробки передач и на рычаги гидронавесной системы. В качестве параметра, характеризующего нагрузочный режим, при этом может использоваться давление наддува P_k или частота вращения ротора турбокомпрессора, так как они связаны с эффективной мощностью N_e ДВС соотношениями:

$$N_e = k_{TH} P_k \omega_D;$$

$$\tilde{P}_k = (\tilde{\omega}_T - \Theta_B \tilde{\omega}_D) / k_B,$$

где k_{TH} , k_B и Θ_B – конструктивные постоянные системы турбонаддува, ω_D , ω_T – угловые скорости двигателя и ротора турбокомпрессора; $\tilde{\omega}_D$, $\tilde{\omega}_T$ – относительные приращения угловых скоростей ω_D и ω_T к их значениям ω_D^* и ω_T^* в данном установившемся режиме: $\tilde{\omega}_D = \Delta\omega_D / \omega_D^* = (\omega_D - \omega_D^*) / \omega_D^*$; $\tilde{\omega}_T = \Delta\omega_T / \omega_T^* = (\omega_T - \omega_T^*) / \omega_T^*$.

Обозначим плотность распределения случайной величины x (параметра Π или ω_D) f_x . Тогда вероятность нахождения ДВС в оптимальной зоне позиционирования характеризуется зависимостью для Π и ω_D :

$$f_{O.X} = \int_{C_H}^{C_B} f(x) dx,$$

а вне зоны –

$$\left. \begin{aligned} f_{B.X} &= \int_{C_H}^{C_B} f(x) dx; \\ f_{H.X} &= \int_{-\infty}^{C_H} f(x) dx, \end{aligned} \right\},$$

где в качестве x может выступать параметр нагрузки Π или скорости ω_D ; C_H , C_B – нижняя и верхняя границы зоны величины x (т.е. Π_H , Π_B , или $\omega_{D.H}$, $\omega_{D.B}$).

Так как элементы САУР (измерительно-преобразовательный, усилительный, исполнительный и др.) имеют погрешность измерения и преобразования δ_x величины x (параметра Π – δ_Π и величины ω_D – δ_ω), то попадание в зону обеспечивается с некоторой неопределенностью. Естественно предположить, что величины Π и ω_D , а также δ_Π и δ_ω в вероятностном смысле независимы. Тогда результат попадания в оптимальную зону описывается композицией плотности распределения f_x (т.е. $f(\Pi)$ или $f(\omega_D)$) величины x (Π или ω_D) и плотности распределения погрешности $\varphi(\delta_x)$ измерения (и управления) δ_x (т.е. δ_Π и δ_ω) величины x (Π или ω_D).

На практике выполняются условия: $C_B - C_H > \delta_{x,max}$ (для Π и ω_D). Поэтому вероятность ошибки первого рода (принятие режима оптимальной нагрузки за режим выхода из зоны) равна (для Π и ω_D):

$$P_{\alpha,x} = \int_0^{C_B - C_H} \left[\int_{C_B - \delta_x}^{C_B} f(x) dx \right] \varphi(\delta_x) d\delta_x + \int_{-(C_B - C_H)}^0 \left[\int_{C_H}^{C_H - \delta_x} f(x) dx \right] \varphi(\delta_x) d\delta_x.$$

Вероятность ошибки второго рода (принятие режима нахождения вне зоны оптимального режима) равна (для Π и ω_D):

$$P_{\beta,x} = \int_0^{C_B - C_H} \left[\int_{C_H - \delta_x}^{C_H} f(x) dx \right] \varphi(\delta_x) d\delta_x + \int_{-(C_B - C_H)}^0 \left[\int_{C_B}^{C_B - \delta_x} f(x) dx \right] \varphi(\delta_x) d\delta_x.$$

В силу случайного характера изменения нагрузки МТА и влияния множества факторов на это изменение можно полагать, что процесс нагрузки подчиняется нормальному закону распределения вероятностей. Это справедливо и для параметра нагрузки, функционально связанного со степенью нагрузки. Погрешности измерения и преобразования Π и ω_D также можно считать распределенными по нормальному закону. Рассмотрим случай, когда средние значения Π и ω_D совпадают с серединой оптимальной зоны и с их номинальными значениями (из-за симметричности законов распределения и границ зоны относительно ее середины полученные результаты можно распространить при нахождении дизеля в любой точке зоны). При этом считаем, что систематические погрешности измерения и преобразования величины x (Π или ω_D) устранены. Введем обозначения: $\eta = (C_B - C_H) / 2\sigma_x$; $\eta_\delta = 6\sigma_{\delta_x} / (C_B - C_H)$; $\eta_k = 3\sigma_{\delta_x} / \sigma_x$, которые справедливы

как для Π , так и для ω_D (здесь σ_x и σ_{δ_x} – средние квадратические отклонения величины x и погрешности δ_x). Тогда для Π и ω_D выражения вероятностей $P_{\alpha x}$ и $P_{\beta x}$ примут вид:

$$\left. \begin{aligned} P_{\alpha x} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{6\eta/\eta_x} e^{-\delta_x^2/2} d\delta_x \int_{\eta-(\delta_x\eta_x/3)}^{\eta} e^{-x^2/2} dx; \\ P_{\beta x} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{6\eta/\eta_x} e^{-\delta_x^2/2} d\delta_x \int_{-\eta-(\delta_x\eta_x/3)}^{-\eta} e^{-x^2/2} dx, \end{aligned} \right\}$$

Упрощенная функциональная схема разработанной САУР представлена на рис. 2.

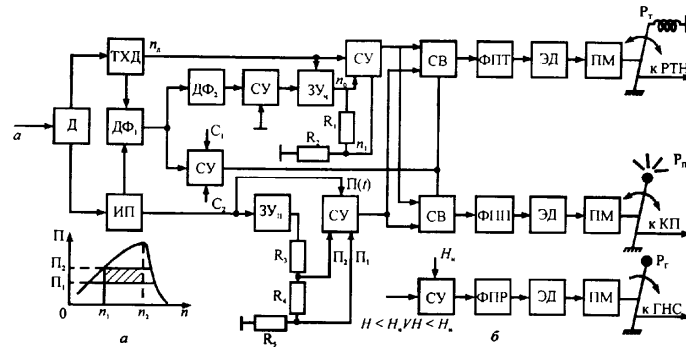


Рис. 2. Оптимальная зона управления энергетическими режимами МТА (а) и упрощенная функциональная схема САУР (б): Д — двигатель, ТХД — тахометр двигателя, ДФ₁ — дифференциатор $d\Pi/dn_\partial$, ДФ₂ — дифференциатора $d^2\Pi/d^2n_\partial$, СУ — сравнивающее устройство, ИП — измеритель параметра нагрузки $\Pi(t)$, ЗУ_ч и ЗУ_п — запоминающие устройства соответственно частоты вращения двигателя и параметра нагрузки, СВ — схемы выбора команды включения, ФПТ, ФПП и ФПР — функциональные преобразователи сигналов соответственно топливоподачи, переключения передач и положения рабочих органов, ЭД — электродвигатели исполнительных устройств, ПМ — передаточные механизмы исполнительных устройств, Р_т, Р_п, Р_г — рычаги управления соответственно топливоподачей, переключением передач и гидравлической системой, РТН — рейка топливного насоса, КП — коробка передач, ГНС — гидравлическая система.

САУР содержит три независимых контура управления: топливоподачей, переключением передач, положением рабочих органов сельхозмашин. Поскольку параметры, адекватно отражающие степень нагрузки, функционально связаны с N_e , то изменяемые параметры нагрузки и скорости имеют аналогичную зону. Контур управления замыкается только при выходе за пределы зоны скоростной характеристики ДВС (заштрихованной на рис. 1), где в качестве параметра Π использован параметр P_k . Так как статические скоростные характеристики ДВС по мощности и по расходу топлива имеют экстремумы, то при нахождении МТА внутри зоны и при достаточно продолжительном участке с незначительной вариабельностью тягового сопротивления существует дополнительная возможность повышения производительности МТА за счет прогнозирования нагрузки и оптимизации управления с помощью предсказывающих устройств — экстраполяторов, позволяющих определить значение сигнала на выходе МТА, после поступления на его вход управляющего или возмущающего воздействия до того, как это значение фактически будет достигнуто, а также вычислить оптимальные значения управляющих воздействий. Выходные сигналы такого рода экстраполяторов смогут обеспечить необходимую коррекцию управляющего устройства (УУ) и позволят существенно улучшить качество системы управления.

Рассмотрим частный случай, когда конечное состояние МТА может характеризоваться значением только одной из обобщенных координат Π или ω_{Π} : $y_1(t_k) = y(t_k)$. Экстраполятор определяет текущую оценку $y(t_k, t)$ конечного значения выходной координаты $y(t)$. Если измеряется возмущающее воздействие, то может быть применен также экстраполятор, определяющий текущую оценку $\xi(t_k, t)$ его конечного значения координаты $\xi(t)$. Принцип действия САУР с предсказывающим блоком (экстраполятором) состоит в следующем (рис.3).

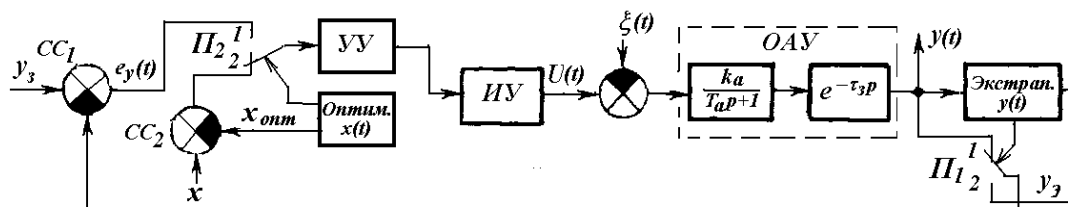


Рис. 3. Функциональная схема САУР с предсказывающим блоком (экстраполятором) и оптимизатором.

При появлении существенных возмущающих воздействий (резком изменении нагрузки) экстраполятор вычисляет значение $y_3(t)$, которое соответствует заданному моменту t_k , и при поступлении команды из экстраполятора, например, после второго измерения $y(t)$, на управляемый электронный переключатель Π_1 для установки его во вторую позицию вводит значение $y_3(t)$ на второй вход схемы сравнения CC_1 , на первый вход которой подается сигнал с выхода задающего устройства $y_3(t)$. Сигнал рассогласования $e_y(t) = y_3(t) - y_3(t)$ с выхода CC_1 подается на управляющее устройство $УУ$, которое вырабатывает значение и знак управляющего воздействия $U(t)$, поступающего на объект автоматического управления (ОАУ) с исполнительного устройства $ИУ$. При достижении $y(t) - y_3(t) < \Delta_{y \text{ доп}}$, где $\Delta_{y \text{ доп}}$ – допустимое значение отклонения, с экстраполятора подается команда на установку переключателя в первую позицию, при этом на второй вход схемы сравнения CC_1 , поступает сигнал управляемой переменной $y(t)$. Система управления работает в обычном режиме.

3. Заключение

Разработанные алгоритмы и структура системы управления механизированными технологическими процессами возделывания зерновых культур обеспечивают реализацию эффективной системы точного земледелия, базирующейся на применении комбинированных, оперативно перестраиваемых рабочих машин, охваченных системами автоматического управления режимами работы.

Список литературы

1. Добролюбов И.П., Утенков Г.Л. Рациональные алгоритмы управления МТА // Тракторы и сельхозмашины. 2007. № 10. С. 9-11.
2. Добролюбов И.П., Утенков Г.Л. Экологические и энергосберегающие адаптивные агрегаты почвообработки и посева зерновых культур // Экологические аспекты технологий производства продукции растениеводства // Междунар. агроэкологич. Форум. 21-23 мая 2013 г. Санкт-Петербург. Т. 2. Россельхозакадемия, СПб.: Северо-западный НИИ механизации и электрификации сельского х-ва, 2013. С. 31-36.

3. Утенков Г.Л., Добролюбов И.П. Моделирование рабочих процессов гибких автоматизированных технологических комплексов почвообработки. Новосибирск: СФНЦА РАН. НГАУ, 2018. 204 с.