

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВТОРНЫХ ОСАДКОВ ПОЧВЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ХОДОВЫХ СИСТЕМ МОБИЛЬНОЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

И.Н. Шило, докт. техн. наук, профессор, Н.Н. Романюк, канд. техн. наук, доцент, А.Н. Орда, докт. техн. наук, профессор, В.А. Шкляревич, ст. преподаватель (БГАТУ); А.С. Воробей, канд. техн. наук (РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»)

Аннотация

В статье на основании связи между энтропией процесса и вероятностью данного состояния получены зависимости, которые позволяют определить деформацию почвы с разными физико-механическими свойствами при различных режимах нагружения и параметрах ходовых систем машинно-тракторных агрегатов.

In the article on the basis of the relationship between entropy process and probability of the state dependencies which allow determining the deformation of soils with different physical and mechanical properties under various loading conditions and parameters of running systems of tractor units are obtained.

Введение

Ухудшение свойств почвы вследствие многократного воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов (МТА) ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Так, урожайность зерновых в следах тракторов снижается на 10-15 %, а корнеклубнеплодов – на 20-30 %. Суммарная площадь следов движителей МТА почти в 2 раза превышает площадь обрабатываемой поверхности; 10-12 % площади поля подвергается воздействию ходовых систем от 6 до 20 раз, 65-80 % – от 1 до 6 раз и только 10-15 % свободны от такого воздействия [1].

Повышение плотности почвы, вызванное воздействием движителей тракторов и сельскохозяйственных машин, привело к увеличению твердости почвы в 2-3 раза. Между твердостью, плотностью и удельным сопротивлением почвы при вспашке существует тесная корреляционная связь. Удельное сопротивление при обработке пахотного слоя после прохода тракторов повышается на 15-65 %, а транспортных средств и комбайнов – на 60-90 % [1].

Происходящий в результате воздействия ходовых систем МТА на почву процесс «деформирование – уплотнение – разуплотнение – накопление уплотнения почвы» зависит как от режимов эксплуатации техники, так и от изменяющихся свойств почвы в зависимости от ее типа, агрофона и периодов года. Для прогнозирования показателей воздействия на почву ходовых систем, учитывающих тип и состояние почвенного агрофона, и определения перспективных путей улучшения их конструкций с повышенными агроэкологическими свойствами необходимы обоснование и закономерности накопления повторных осадков почвы при воздействии ходовых систем.

Основная часть

На процесс слеодообразования многоосными ходовыми системами влияют как реологические факторы (время запаздывания деформации, период релаксации), так и неизучаемые в реологии явления, связанные с переукладкой частиц почвы при повторных нагружениях. Определим закономерность нарастания осадки деформатора при повторных нагружениях почвы. В данном случае можно применить зависимость Больцмана, успешно применявшуюся при исследовании деформации почв и грунтов Г.И. Покровским, Н.А. Наседкиным и Ю.Л. Мотылевым [1].

Согласно зависимости Больцмана, энтропия процесса S пропорциональна логарифму вероятности данного состояния W (статистическая интерпретация второго начала термодинамики). При повторных деформациях вероятность W данного состояния увеличивается с ростом числа нагружений n . Тогда зависимость Больцмана примет вид:

$$S = c_1 \cdot \ln W + c_2, \quad (1)$$

где c_1 и c_2 – постоянные величины.

С другой стороны, энтропия процесса деформации почвы пропорциональна совершаемой при этом работе A_n [2]:

$$S = c \cdot A_n,$$

где c – коэффициент пропорциональности.

Работа деформации почвы состоит из работы упругой деформации и работы необратимой деформации. Работа внешних сил, затраченная на упругую деформацию почвы, накапливается в ней за счет преобразования кинетической энергии в потенциальную. Эта энергия возвращается при восстановлении упругой деформации.

Энергия, затрачиваемая на необратимую деформацию почвы, не накапливается в ней, а полностью рассеивается, превращаясь во внутреннюю энергию хаотического (теплового) движения частиц. Внутренняя энергия почвы E может быть представлена в следующем виде [2]:

$$E = F + \Theta \cdot S,$$

где F – свободная энергия, Дж;
 Θ – абсолютная температура, К;
 S – энтропия, Дж/К.

Свободная энергия F может быть превращена во внешнюю работу при обратимом изотермическом процессе. Связанная энергия $S \cdot T$ может быть получена лишь в виде тепла. Энтропия системы является мерой связанной энергии и возрастает только в результате необратимых процессов.

Для определения удельной работы A_n , найдем значение определенного интеграла:

$$A_n = \int_0^{h_n} \sigma(h) dh, \quad (2)$$

где h_n – деформация почвы после n нагружений, м;
 $\sigma(h)$ – функциональная зависимость между напряжением σ и деформацией почвы h .

Эксперименты [1] показали, что зависимость $\sigma(h)$ при повторных нагружениях непрерывной является только для упрочняющихся почв. Характер деформации таких почв во времени показан на рис. 1 а.

Особенностью упрочняющихся почв является то, что деформация их при каждом последующем нагружении сопровождается повышением напряжения в зоне контакта по сравнению с предыдущим. Это объясняется увеличением интенсивности нагружения при повторных деформациях, в частности из-за уменьшения площади контакта колес с почвой при повторных проходах по следу. На рис. 1 а показан график зависимости напряжения от деформации при повторных

нагружениях связанных упрочняющихся почв с одинаковыми по глубине физико-механическими свойствами, а на рис. 1 б – рыхлых почв с плотным подстилаемым основанием.

Для связанных почв с одинаковыми по глубине свойствами зависимость $\sigma(h)$ подчиняется функции гиперболического тангенса [3]:

$$\sigma = p_0 \cdot th \left(\frac{k}{p_0} \cdot h \right), \quad (3)$$

где p_0 – предел несущей способности почвы, Па;
 k – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м³.

Подставив зависимость (3) в подинтегральное выражение (2) и решив его, получим:

$$A_n = \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln ch \left(\frac{k}{p_0} h \right).$$

Тогда энтропия процесса деформации почвы выразится уравнением:

$$S = c \cdot \frac{p_0^2}{k} \ln ch \left(\frac{k}{p_0} h \right). \quad (4)$$

Приравняем правые части формул (1) и (4)

$$c_1 \cdot \ln n + c_2 = c \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln ch \left(\frac{k}{p_0} h \right),$$

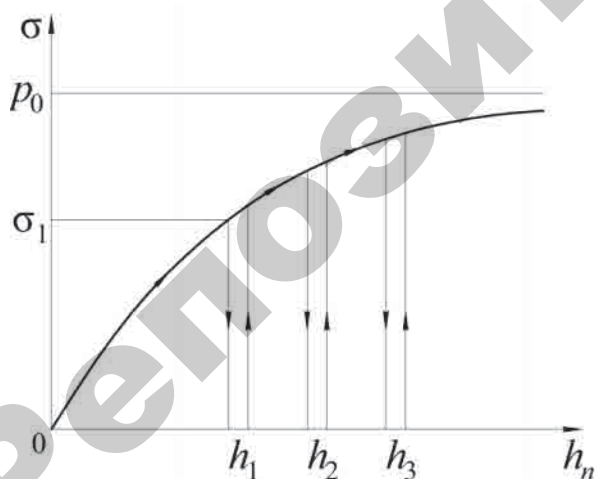
где n – число нагружений (количество осей ходовых систем)

и преобразуем выражение к виду

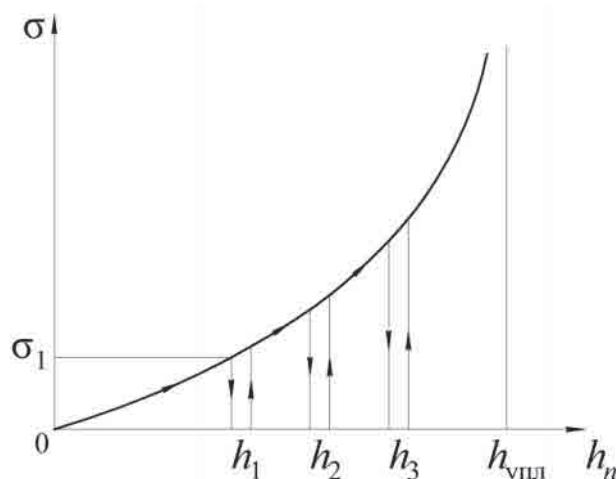
$$c_1 \cdot \ln n + \ln c_3 = c \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln ch \left(\frac{k}{p_0} h \right),$$

где $\ln c_3 = c_2$.

Потенцируем правую и левую части последнего уравнения и приравняем выражения, стоящие под знаками логарифмов:



а



б

Рисунок 1. Закономерности накопления повторных осадков для упрочняющихся почв:
а) связанные почвы; б) почвы, подготовленные под посев

$$c_3 \cdot n^{c_1} = \left(ch \left(\frac{k}{p_0} h \right) \right)^{c \cdot p_0^2 / k}$$

Откуда

$$ch \left(\frac{k}{p_0} h \right) = c_3^{k/(c \cdot p_0^2)} \cdot n^{(c_1/c) \cdot (k/p_0^2)} \quad (5)$$

Обозначив

$$c_3^{k/(c \cdot p_0^2)} = a'; \quad \frac{c_1}{c} = b'; \quad b' \cdot \frac{k}{p_0^2} = B,$$

уравнение (5) запишем в виде:

$$ch \left(\frac{k}{p_0} h \right) = a' \cdot n^B,$$

Откуда

$$h = \frac{p_0}{k} \cdot Arch(a' \cdot n^B). \quad (6)$$

Коэффициент a' найдем из условия, что величина деформации при первом нагружении определится из зависимости (3):

$$h_1 = \frac{p_0}{k} \cdot Arth \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right), \quad (7)$$

где σ_1 – напряжение в контакте деформатора с почвой при первом нагружении.

При первом нагружении ($n = 1$) формула (6) примет вид:

$$h_1 = \frac{p_0}{k} \cdot Arch(a'). \quad (8)$$

Приравняв правые части формул (7) и (8), найдем:

$$Arch(a') = Arth \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right). \quad (9)$$

Из преобразований обратных гиперболических функций известно, что

$$Arch(a') = Arth \left(\frac{\sqrt{a'^2 - 1}}{a'} \right). \quad (10)$$

Из зависимостей (9) и (10) находим:

$$\frac{\sqrt{a'^2 - 1}}{a'} = \frac{\sigma_1}{p_0}.$$

Отсюда

$$a' = \frac{1}{\sqrt{1 - \sigma_1^2 / p_0^2}}.$$

Подставив значение a' в формулу (6), найдем зависимость накопления повторных осадок для связанных почв с одинаковыми по глубине свойствами:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \cdot Arch \left(\frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma^2 / p^2}} \right), \quad (11)$$

где B – коэффициент накопления повторных осадок связанных почв.

Применим зависимость Больцмана для определения закономерности нарастания деформации от повторных нагружений для рыхлых почв, подстилаемых плотным основанием (рис. 1 б). Для таких почв зависимость между напряжением и деформацией определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{a}{b} \cdot tg(a \cdot b \cdot h), \quad (12)$$

где $a = \sqrt{k_0}$;

$$b = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{h_{\text{упл}} \sqrt{k_0}};$$

$$h_{\text{упл}} = H \cdot \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}}}{(1 + \varepsilon_0)[1 - 2 \cdot \nu(1 + \varepsilon_{\text{min}})]};$$

k_0 – коэффициент объемного смятия почвы в начале деформации, Па/м;

$h_{\text{упл}}$ – предельная величина деформации, м;

ε_0 – коэффициент пористости почвы до нагружения;

ε_{min} – минимально возможный коэффициент пористости почвы;

ν – коэффициент бокового расширения почвы для случая деформирования с ограниченной возможностью расширения.

Значение удельной работы, определяемой по зависимости (2) с учетом формулы (12), будет равно

$$A_n = -\frac{1}{b^2} \ln |\cos(a \cdot b \cdot h)|.$$

Так как энтропия процесса деформации почвы пропорциональна совершаемой работе, то с учетом зависимости (1) получим

$$c_1 \cdot \ln n + c_2 = -\frac{c}{b^2} \ln |\cos(a \cdot b \cdot h_n)|$$

После преобразований получим

$$\cos(a \cdot b \cdot h_n) = c_4^{b^2/c} \cdot n^{-c_1 \cdot b^2/c}.$$

Введем обозначения:

$$c_4^{-b^2/c} = d; \quad \frac{c_1 \cdot b^2}{c} = B_1.$$

Тогда

$$a \cdot b \cdot h_n = Arc \cos(d \cdot n^{-B_1}).$$

Отсюда деформация почвы после n нагружений

$$h_n = \frac{1}{a \cdot b} Arc \cos(d \cdot n^{-B_1}), \quad (13)$$

где B_1 – коэффициент накопления повторных осадок для почв с плотным подстилаемым основанием.

Значение коэффициента d найдем из условия, что величина деформации при первом нагружении определяется из зависимости (12).

Зависимость (13) при первом нагружении принимает вид:

$$h_1 = \frac{1}{a \cdot b} \text{Arc cos } d. \quad (14)$$

Приравняв правые части зависимостей (12) и (14), получим

$$\text{Arc cos } d = \text{Arctg } \frac{b}{a} \sigma. \quad (15)$$

Из преобразований обратных тригонометрических функций известно, что

$$\text{Arc cos } d = \text{Arctg } \frac{\sqrt{1-d^2}}{d}. \quad (16)$$

Из зависимостей (15) и (16) находим, что

$$d = \frac{1}{\sqrt{1 + (b^2/a^2) \cdot \sigma^2}}.$$

С учетом найденного значения коэффициента d зависимость (13) накопления повторных осадок упрочняющихся почв с плотным подстилаемым основанием примет вид:

$$h_n = \frac{1}{a \cdot b} \text{Arc cos } \left(\frac{n^{-B_1}}{\sqrt{1 + (b^2/a^2) \cdot \sigma^2}} \right). \quad (17)$$

Найдем зависимость между сопротивлением и осадкой слабо упрочняющихся почв. Характер процесса деформации слабо упрочняющихся почв показан на рис. 2. К таким почвам относятся суглинистые и глинистые почвы высокой влажности.

При повторных нагружениях слабо упрочняющихся почв с одинаковой по глубине плотностью рост напряжения от цикла к циклу незначительный, а нарастание осадки штампа весьма ощутимо (рис. 2). Нарастание осадки деформатора на таких почвах при повторных нагружениях подчиняется зависимости [4]:

$$h_n = h_1 \cdot (1 + k_u \cdot \lg n), \quad (18)$$

где k_u – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

Подставив вместо h_1 значение этой величины [1], получим следующую зависимость:

$$h_n = \frac{p_0}{k} (1 + k_u \cdot \lg n) \cdot \text{Arth} \left(\frac{\sigma}{p_0} \right). \quad (19)$$

Зависимость между напряжением и повторными деформациями описывается кусочно-непрерывной функцией. Функция $\sigma = f(h)$ при каждом повторном нагружении подчиняется зависимости гиперболического тангенса. Рассмотрим, чему равны при этом константы p_0 и k . Сопротивление почвы при повторных нагружениях может уменьшаться, или увеличиваться по сравнению с первым приложением нагрузки в зависимости от физико-механических свойств почвы и величины давления на нее. В соответствии с этим будут изменяться коэффициенты p_0 и k . Снижение сопротивления происходит в том случае, если при первом нагружении структура почвы разрушается (особенно, когда верхние слои почвогрунта прочнее нижележащих). Несущая способность и коэффициент объемного смятия при этом уменьшаются. Увеличение сопротивления характерно для почв, способных к уплотнению и упрочнению структуры (почвы низкой влажности). Повторное деформирование в данном случае связано с преодолением сил трения покоя, которые превосходят по величине силы трения скольжения.

У влажных почв, однородных по глубине, силы

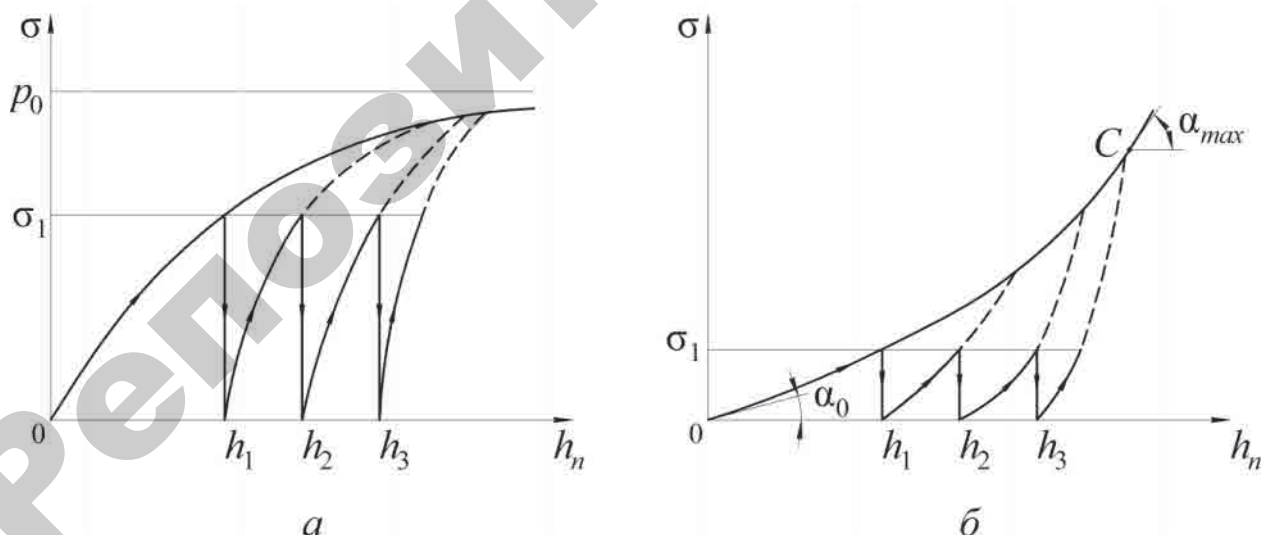


Рисунок 2. Закономерности накопления повторных осадок для слабо упрочняющихся почв: а) связные почвы; б) почвы, подготовленные под посев

трения покоя в меньшей степени отличаются от сил трения скольжения, чем у сухих почв. Поэтому при повторных нагружениях, когда необходимо преодолеть силы трения покоя, сопротивление почвы увеличивается менее заметно, чем в предыдущем случае. К тому же здесь почти не происходит образования уплотненного ядра под деформатором, так как деформация влажных почв характеризуется в основном сдвигом частиц. Сопротивление повторным деформациям влажных почв возрастает лишь в начале процесса каждого последующего нагружения. Когда давление будет приближаться к величине несущей способности, различие между сопротивлениями почвы при первом приложении нагрузки и последующих нагружениях исчезнет. Поэтому можно принять, что несущая способность слабо упрочняющихся почв не зависит от количества нагружений.

Увеличение сопротивления в начальный период каждого повторного нагружения будем учитывать изменением коэффициента объемного смятия, который зависит от характера протекания процесса деформации в начальный период. Назовем его условным коэффициентом объемного смятия при n -ом нагружении – $k_{y_{nl}}$. Тогда зависимость между напряжением и деформацией при n -м нагружении запишется следующим образом:

$$\sigma_n = p_0 \cdot th \left(\frac{k_{y_{nl}}}{p_0} \Delta h_n \right),$$

где Δh_n – приращение осадки при n -м цикле, м.

Напряжение σ_n в конце каждого цикла нагружения равно напряжению σ_1 , развиваемому в конце первого цикла. Исходя из этого, найдем условный коэффициент объемного смятия:

$$k_{y_{nl}} = \frac{p_0}{\Delta h_n} \operatorname{Arth} \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right).$$

Приращение осадки при n -ом приложении нагрузки найдем из уравнения (19):

$$\Delta h_n = k_u \cdot \lg \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_0}{k} \operatorname{Arth} \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right).$$

Подставив это выражение в предыдущее, найдем:

$$k_{y_{nl}} = \frac{k}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))}. \quad (20)$$

Зависимость между напряжением и деформацией при n -ом нагружении примет вид:

$$\sigma_n = p_0 \cdot th \left(\frac{k}{p_0} \cdot \frac{1}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))} \cdot \Delta h_n \right). \quad (21)$$

Рассмотрим, как происходит процесс накопления повторных осадок для почвы, подготовленной под посев, подстилаемой плотным основанием высокой влажности (рис. 2 б). В данном случае нельзя пренебречь осадкой подстилаемого основания. Величина

осадки почвы после n нагружений определится из зависимостей (17) и (18):

$$h_n = \frac{1}{a \cdot b_1} (1 + k_u \cdot \lg n) \cdot \operatorname{Artg} \left(\frac{b_1}{a} \cdot \sigma \right). \quad (22)$$

В начале процесса деформирования характер зависимости $\sigma = f(h)$ практически не отличается от случая, когда почва подстиается недеформируемым основанием. Следовательно, коэффициент a определяется согласно зависимости (12). Коэффициент b найдем из условия, что производная σ по h в точке C (рис. 2 б) равна максимальному коэффициенту объемного смятия – k_{max} :

$$\sigma' = a^2 \cdot \frac{1}{\cos^2(a \cdot b \cdot h_{y_{nl}})} = k_{max}.$$

После преобразований с учетом значения коэффициента a получим:

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{k_0 \cdot h_{y_{nl}}}} \cdot \operatorname{Arc} \cos \sqrt{\frac{k_0}{k_{max}}}. \quad (23)$$

Таким образом, по зависимости (22) можно рассчитать глубину осадки деформатора для случая, приведенного на рис. 2 б.

Выводы

На процесс слеодообразования многоосными ходовыми системами МТА влияют не только реологические факторы (период релаксации, время запаздывания деформации), но и не изучаемые в реологии явления, связанные с переукладкой частиц почвы при повторных нагружениях.

Для определения закономерностей накопления повторных осадок применена зависимость Больцмана, связывающая энтропию процесса и вероятность данного состояния (статистическая интерпретация второго начала термодинамики). Полученные зависимости (11), (17), (19) и (22) позволяют определить деформацию почвы в зависимости от различных режимов работы и параметров ходовых систем МТА, а также физико-механических свойств почвы.

Предложенные зависимости между сопротивлением почвы и ее осадкой при непрерывном и чередующихся режимах нагружения в последующем могут найти применение при оценке уплотнения почвы и определении энергетической эффективности ходовых систем машинно-тракторных агрегатов.

ЛИТЕРАТУРА

- Орда, А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05. 20. 03 / А. Н. Орда. – Минск, 1997. – 269 с.
- Вядов, С. С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вядов. – Минск: Высшая школа, 1978. – 448 с.

3. Кацыгин, В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В.В. Кацыгин // Вопросы сельскохозяйственной механики. – Минск: Ураджай, 1964. – Т. 13. – С. 5 – 147.

4. Шило, И. Н. Влияние почвенных условий на формирование машинно-тракторных агрегатов / И. Н. Шило, А. Н. Орда, Н. А. Гирейко, А. Б. Селеша // Агротранспорт, 2006. – № 1. – С. 7-11.

УДК 629.336.063

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.10.2014

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ОТБОРА МОЩНОСТИ ТРАКТОРА

Д.А. Жданко, канд. техн. наук, доцент, В.Я. Тимошенко, канд. техн. наук, доцент, А.В. Новиков, канд. техн. наук, доцент, А.А. Зенько, студент (БГАТУ)

Аннотация

Рассмотрены вопросы стабилизации частоты вращения вала отбора мощности (ВОМ) трактора с целью повышения экономичности и качества выполняемых сельскохозяйственных работ.

The problems of stabilization of the drive shaft of the tractor to improve the efficiency and quality of performance of agricultural work are analyzed.

Введение

Двигатель является источником энергии и движущей силы трактора. От динамических и экономических его свойств в значительной степени зависят эксплуатационные качества трактора и машинно-тракторного агрегата (МТА). Основными эксплуатационными показателями работы тракторного двигателя являются [1]: эффективная мощность, эффективный крутящий момент, часовой и удельный расход топлива, частота вращения коленчатого вала.

При работе двигателя на максимальном скоростном режиме развиваемая им мощность при выполнении многих сельскохозяйственных операций используется не полностью. Для более экономичной работы МТА в этом случае переходят на частичный режим. При этом мощность двигателя может не превышать требуемого значения для выполнения технологического процесса, но при этом снижается частота вращения коленчатого вала двигателя. Снижение ее практически не сказывается на качестве выполнения операций, выполняемых тяговыми машинами с пассивными рабочими органами.

Однако таких машин становится все меньше, даже на почвообработке, где традиционно использовались машины с пассивными рабочими органами, сегодня используются машины с приводом от ВОМ трактора.

Машины с активным приводом рассчитаны на определенную частоту вращения ВОМ, при которой обеспечивается необходимое качество выполняемого технологического процесса. Особенно это важно для обеспечения требуемого качества уборочных, посевных работ. Так изменение частоты вращения ВОМ при уборке силосных культур, заготовке сенажа приводит к изменению длины резки и даже к забиванию

силосопроводов кормоуборочных комбайнов.

Работа же двигателя на максимальной частоте вращения экономически нецелесообразна, так как будет иметь место повышенный расход топлива.

Применение синхронного привода ВОМ не решает обозначенную проблему, так как этот привод синхронизирует частоту вращения ВОМ и скорость движения МТА.

В связи с этим для обеспечения требуемого качества выполнения работ МТА с машинами с активным приводом требуется изыскание возможности стабилизации вращения ВОМ вне зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Основная часть

Запишем уравнение характера изменения тяговой мощности трактора [2]

$$\Delta N_T = (1 - \kappa_m \kappa_o) N_{e_n} \eta_{m_2}, \quad (1)$$

где κ_m – коэффициент приспособляемости дизельного двигателя по моменту;

κ_o – коэффициент приспособляемости дизельного двигателя по частоте вращения;

N_{e_n} – номинальная мощность двигателя, Вт;

η_{m_2} – механический КПД трансмиссии.

У тракторных дизелей коэффициент приспособляемости по моменту $\kappa_m = 1,05 \div 1,2$, а коэффициент приспособляемости по частоте вращения $\kappa_o = 0,8 \div 0,6$ [2].

Тогда

$$\Delta N_T = (0,16 \div 0,36) N_{e_n} \eta_{m_2}. \quad (2)$$

Из уравнения характера изменения тяговой мощ-