

Совершенствование вала отбора мощности тракторов "Беларус"

Д-р техн. наук А. И. БОБРОВНИК (Белорусский НТУ, bobrovnik.ai@yandex.ru)

Аннотация. Наиболее часто в тракторах используются независимые валы отбора мощности (ВОМ). С целью повышения экономичности агрегатов при недогрузке двигателей для тракторов "Беларус" классов 1,4 и 5,0 предложены стабилизированный и экономичный ВОМ, опытные образцы которых прошли заводские испытания.

Ключевые слова: активный рабочий орган, вал отбора мощности, качество технологического процесса, мощность, стабилизированный привод, трактор "Беларус", частичный режим, частота вращения, экономичность.

Повышение производительности труда в с.-х. производстве неразрывно связано с увеличением энергонасыщенности тракторов и рабочих скоростей движения машинно-тракторных агрегатов (МТА). Использование мощности трактора через систему отбора мощности для активного привода рабочих органов сельхозмашин и высокопроизводительных комбинированных агрегатов позволяет производить несколько технологических операций за один проход, значительно сократить энергозатраты на некоторые из них, повысить экономичность работ. Большая номенклатура машин с приводом рабочих органов от ВОМ производится в странах СНГ и Дальнего Зарубежья.

С учетом возрастающей тенденции к расширению номенклатуры и количественного выпуска машин с активными рабочими органами, а также повышения агротехнических требований к качеству технологических процессов проблема совершенствования и развития систем отбора мощности тракторов требует решения.

Стремясь наиболее полно удовлетворить требования потребителей, зарубежные фирмы предлагают широкую гамму тракторов в диапазоне мощности 11–342 кВт. В конструкциях этих тракторов реализуются технические решения с применением гидравлических и пневматических систем, средств автоматизации и электроники, обеспечивающих значительное повышение как надежности машин, так и качества выполнения технологических процессов.

Существует несколько способов передачи мощности от двигателя трактора к активным рабочим органам машин. По виду энергоносителя, посредством которого происходит передача мощности между трак-

тором и агрегатом, системы отбора мощности подразделяются на: механические, или ВОМ; гидравлические; электрические и пневматические [1]. Электрический и пневматический приводы не нашли широкого применения на тракторах, а гидравлические системы отбора мощности применяются только совместно с ВОМ. Это связано с рядом преимуществ, которыми механический привод обладает в сравнении с гидравлическими системами [1]: более высокий КПД, составляющий 0,9–0,95 против 0,7–0,8 для гидропривода; возможность передачи всей мощности двигателя; простота и технологичность конструкции; меньшая стоимость изготовления; простота обслуживания и ремонта. Поэтому механический привод остается основным типом привода рабочих органов сельхозмашин от двигателя трактора.

Благодаря возможностям современного машиностроения существ-

ует широкая номенклатура ВОМ, классификационная схема которых представлена на рис. 1.

Основные производители тракторов в широком диапазоне мощности — Case IH, Same Deutz-Fahr, Fendt, John Deere, Lamborghini, Massey Ferguson. Тракторы с двигателями наибольшей мощности (324 и 342 кВт) выпускаются под маркой John Deere. На малогабаритных тракторах специализируются такие производители, как Hako, Iseki, Kubota, Goldoni и Shibaura.

Для привода активных рабочих органов машин и орудий тракторы оснащаются ВОМ заднего расположения: независимыми односкоростными (540 мин⁻¹, New Holland, Shibaura, Carraro и др.) или двухскоростными (540 и 1000 мин⁻¹, Holder, Iseki и др.), либо зависимыми односкоростными (Massey Ferguson). Преобладают задние ВОМ, однако по заказу тракторы оборудуются еще и передними односкоростными

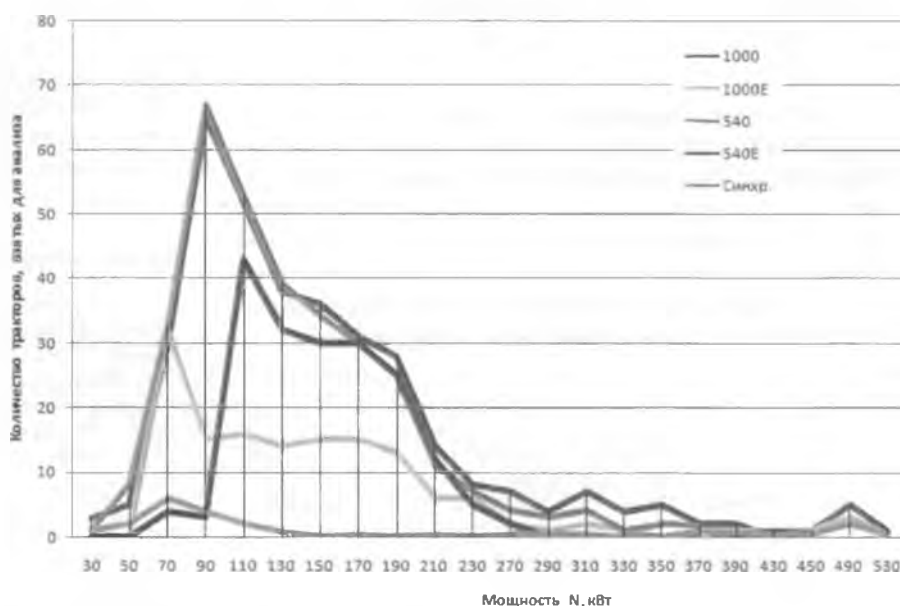


Рис. 1. График анализа показателей применения ВОМ на зарубежных тракторах

ми ВОМ. Анализ приводов задних ВОМ ведущих зарубежных фирм показывает, что основной тип привода на тракторах с мощностью двигателя на ВОМ выше 36,8 кВт — это независимый привод (см. рис. 1).

Для тракторов с мощностью двигателя на ВОМ менее 36,8 кВт основным типом привода остается зависимый (синхронный). Определяется это значительно большей стоимостью независимого привода в сравнении с теми преимуществами, которые могут быть реализованы при его наличии на тракторах малой мощности. Некоторые фирмы производят установку зависимого или независимого привода ВОМ по заказу или в зависимости от комплектации трактора.

При независимом приводе ВОМ его приводной механизм связан с двигателем до устройства для управления подачи мощности к движителю трактора. Для управления подачей мощности к его хвостовику ВОМ с независимым приводом снабжается собственным фрикционным устройством.

В связи с постоянным совершенствованием электроники в мировом тракторостроении продолжается развитие электронного управления систем отбора мощности тракторов и сельхозмашин. Практически все производители сегодня оснащают свои тракторы электронными системами управления передним и задним навесными устройствами, передним и задним ВОМ, распределителями гидронавесной системы и т. д.

При комплектации современных тракторов стало нормой их оснащение электрогидравлическими системами управления включением привода переднего и заднего ВОМ с помощью кнопочных выключателей, расположенных в кабине на правом боковом пульте. Для плавного пуска заднего ВОМ, обеспечивающего привод тяжелых машин, электронный блок формирует управляющий сигнал со специальным законом управления. При включении ВОМ может использоваться обратная связь по частоте вращения хвостовика ВОМ. Для удобства агрегатирования трактора с сельхозмашинами с приводом от заднего ВОМ для проворачивания хвостовика ВОМ до

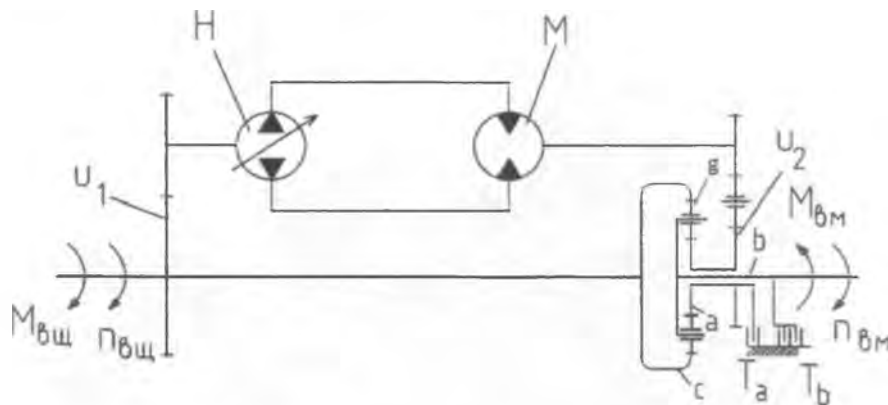


Рис. 2. Схема двухпоточного независимого ВОМ

совпадения шлиц снаружи трактора, обычно на задних крыльях, устанавливаются кнопочные выключатели управления ВОМ.

Важные преимущества при отборе мощности трактора дает система впрыска топлива двигателя мобильной машины с электронным регулированием. Она обеспечивает оптимальный рабочий режим двигателя в любой точке поля, при любых характеристиках двигателя и выполняемых технологических операциях благодаря большому количеству входных данных, высокой точности, самодиагностике и автоматической подстройке необходимых параметров.

Обороты переднего и заднего ВОМ, процент загрузки двигателя и другие параметры можно менять с помощью устанавливаемого на тракторе монитора, на котором отображаются практически все информативные параметры трактора.

С целью повышения экономичности МТА на работах с незначительной нагрузкой двигателя по мощности некоторые зарубежные тракторы снабжаются трехскоростными ВОМ. Примером могут служить тракторы моделей 303LS-308LS производства Fendt, на которых по заказу потребителя может устанавливаться ВОМ, обеспечивающий три частоты вращения выходного хвостовика: 540, 750 и 1000 мин⁻¹.

Привод машин от ВОМ с частотой вращения 750 мин⁻¹ получил специальное название — "экономичный ВОМ". При работе с такой скоростью, за счет возможности обеспечения стандартной частоты вращения ВОМ 540 мин⁻¹, при сниже-

нии частоты вращения двигателя до 70—75 % от номинальной обеспечивается экономия топлива до 30 % [2]. Это вполне окупает затраты, связанные с некоторым усложнением конструкции привода ВОМ. Различные частоты вращения выходного хвостовика ВОМ обеспечиваются переключением муфты.

Massey Ferguson, Steyr и другие производители [2] по заказу оснащают некоторые модели своих тракторов четырехскоростными ВОМ, что позволяет осуществлять работу двигателя на частичных режимах для машин, приводящихся как с низкой стандартизованной частотой вращения 540 мин⁻¹, так и с повышенной — 1000 мин⁻¹.

В приводах современных мобильных машин получают распространение двухпоточные гидрообъемно-механические передачи (ГОМП), в которых мощность передается двумя потоками: через механические и гидравлические звенья. Такая передача на ряде режимов работы имеет более высокий КПД по сравнению с гидрообъемной [3, 4].

Двухпоточная передача заднего ВОМ, разработанная для трактора "Беларус 1221" (рис. 2), состоит из дополнительной гидрообъемной передачи и дифференциального звена, установленного на ВОМ трактора, выполненного в виде трехзвенного дифференциального механизма со смешанным зацеплением шестерен с сателлитами *g*. Она отличается от известной схемы [4] тем, что ведущим в дифференциальном механизме является эпициклическое колесо *c*. При этом через гидрообъемную передачу передается только

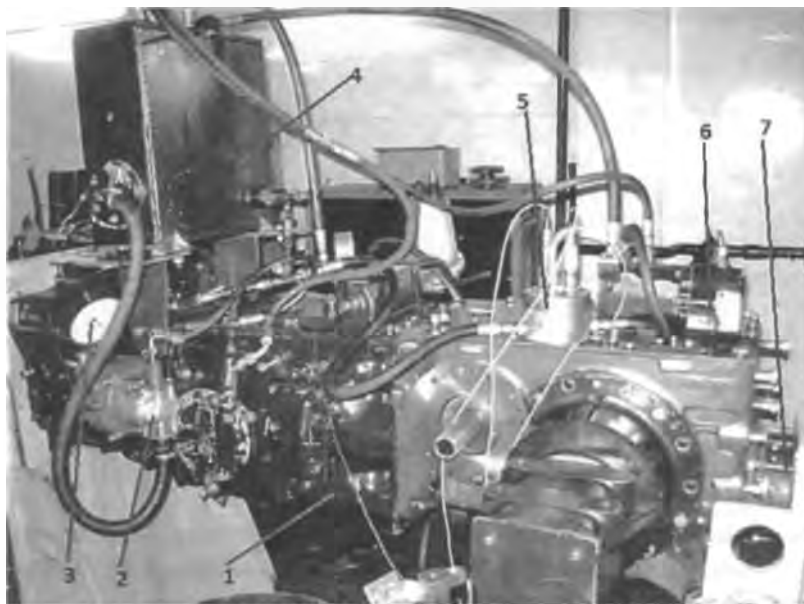


Рис. 3. Двухпоточная передача заднего ВОМ, разработанная для трактора "Беларус 1221":

1 — трансмиссия трактора; 2 — насос НШ 32М-3; 3 — манометр; 4 — бак с рабочей жидкостью; 5 — шестеренный расходомер с датчиками расхода, давления и температуры; 6 — гидромотор Linde НМF36-02; 7 — хвостовик заднего ВОМ

часть мощности двигателя, остальная же мощность передается через механическую. Первый поток мощности передается через эпициклическую шестерню c на сателлиты g и далее на водило b . Здесь присутствуют только механические потери мощности. Второй поток мощности передается через редуктор с передаточным числом U_1 на регулируемый гидронасос H , далее на нерегулируемый гидромотор M , через редуктор с передаточным числом U_2 — на солнечную шестерню, через сателлиты — на водило b . Здесь мощность теряется в двух редукторах с передаточными числами U_1 и U_2 и в гидрообъемной передаче (ГОП), состоящей из реверсируемого гидронасоса переменной производительности и гидромотора. Таким образом, на водиле b суммируются два потока мощности, которые далее передаются на хвостовик независимого ВОМ трактора.

При $q_H \neq 0$ мощность с ведущего на ведомый вал передается двумя потоками. При этом в зависимости от положения регулировочного элемента гидронасоса солнечная шестерня a планетарного ряда вращается с различными угловыми скоростями и меняет направление вращения. Это позволяет при заданной

частоте вращения $n_{вщ}$ ведущего вала бесступенчато менять частоту и направление вращения $n_{вм}$ ведомого вала. По предложенной схеме разработана конструкция двухпоточного независимого ВОМ для трактора "Беларус 1221", изготовлен опытный образец и проведены заводские испытания на ПО "МТЗ" (рис. 3).

Один из основных показателей гидрообъемной механической передачи — кинематическое передаточное число $U_{ГОМП}$.

Кинематическое передаточное число двухпоточной ГОМП:

$$K = \frac{Z_c}{Z_a};$$

$$U_{ГОМП} = \frac{n_{вщ}}{n_{вм}} = (1 + K) / \left(K + \frac{1}{U_1 U_2 U_{ГОП}} \right),$$

где Z_c , Z_a — число зубьев шестерен соответственно эпициклического и солнечного колес; U_1 , U_2 — передаточные числа.

Тогда для планетарного редуктора трактора "Беларус 1221" при $U_1 = 1$; $U_2 = 1$; $U_{ГОП} = 1$ имеем $U_{ГОМП} = 1,03$.

Крутящие моменты на ведомом и ведущем валах ГОМП $M_{вм}$ и $M_{вщ}$,

Н · м, находим из условия равновесия ведущего вала с учетом КПД передач η_1 , η_2 :

$$M_{вщ} = M_{вм} \left[\frac{K(U_1 \eta_1 U_2 \eta_2 \hat{U}_{ГОП}) + 1}{(1 + K) U_1 \eta_1 U_2 \eta_2 \hat{U}_{ГОП}} \right].$$

Другие параметры двухпоточной ГОМП определены в работе [5].

Наибольшие значения передаточного числа гидрообъемной передачи в диапазоне от 1900 до 1500 мин⁻¹ и от 1500 до 1300 мин⁻¹ наблюдаются при переходе гидрообъемной передачи на реверсивный режим $U_{ГОП} = \infty$.

Для изучения потенциальных возможностей разработанной конструкции проведено экспериментальное исследование влияния режимов нагружения на кинематические и динамические параметры стабилизированного привода.

Экспериментальный испытательный стенд создан на ПО "МТЗ" на базе заднего независимого ВОМ с редуктором 1220-4204005 и экспериментального планетарного регулируемого двухпоточного привода в составе трансмиссии трактора "Беларус 1221". Ведущий вал муфты сцепления соединили с приводной балансирной машиной, а хвостовик заднего ВОМ — с водяным тормозом Horiga DT-2100-1. Управление планетарным редуктором осуществлялось реверсивным гидромотором Linde НМF36-02.

Аппаратурное оснащение испытательного стенда позволяет вести запись с дискретностью отсчета 0,05 с. В экспериментах, проведенных в различных условиях нагружения хвостовика ВОМ, реализуемых с помощью гидротормоза, запись всех перечисленных параметров велась в течение 60 с. При этом частоту вращения хвостовика ВОМ стремились поддерживать постоянной с помощью гидромотора, передающего дополнительный вращающий момент через планетарный редуктор. Результаты испытаний приведены в работе [5]. Конструкция экспериментального независимого вала отбора мощности с редукторами 1220-4204005 и 1220-4204010, кинематически связанными с реверсивным гидромотором Linde, работоспособна.

Модернизация заднего экономического вала отбора мощности

выполнена для трактора "Беларус" класса 5,0. Для обеспечения перехода двигателя на экономичные режимы работы без разрыва потока мощности в серийной конструкции трактора механическое переключение режимов работы экономичного ВОМ заменено на переключение с помощью фрикционных муфт (ФМ) с гидравлическим поджатием (рис. 4).

При одновременном переключении двух передач в течение коротко-

го отрезка времени мощность передается без разрыва потока [4]. Процесс переключения с низшей передачи на экономичную рассмотрен с учетом затрат мощности на сопротивление перекачиванию трактора и сопротивление технологической машины через ВОМ [6].

Важнейшие параметры привода — работа буксования фрикционной муфты, время буксования t_b при включении экономичного режима,

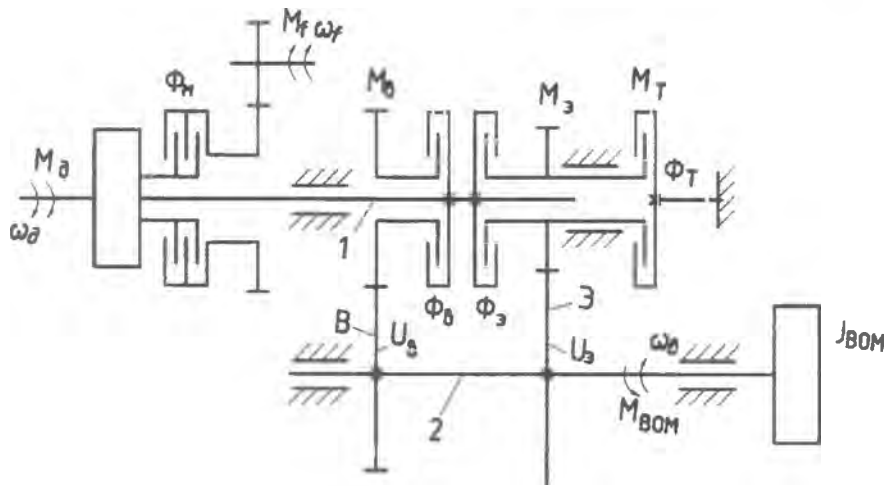


Рис. 4. Двухмассовая динамическая система:

1, 2 — ведущий и ведомый валы ВОМ; Φ_B, Φ_3 — фрикционные передачи высшей и экономичной передач; M_d, ω_d — крутящий момент и угловая скорость коленчатого вала двигателя, приведенные к валу включаемой ФМ; ω_n — угловая скорость ведомого вала; U_B, U_3 — передаточные числа; Φ_n — фрикционная передача главной муфты сцепления; M_f, ω_f — момент сопротивления перекачиванию и угловая скорость МТА при перекачивании; M_B, M_3 — моменты на высшей и экономичной передачах; M_T, Φ_T — момент трения и фрикцион тормоза; В, Э — высшая и экономичная передачи; $M_{ВОМ}, \omega_B$ — момент сопротивления рабочего оборудования и угловая скорость ВОМ

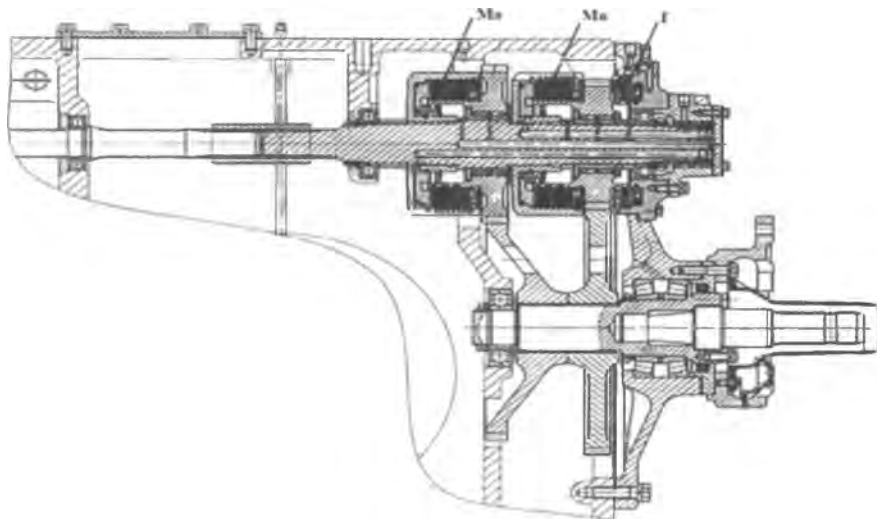


Рис. 5. Конструкция ВОМ 3525-4202010:

M_n, M_B — фрикционные муфты низшей и высшей ступеней; Т — тормоз

время разгона на заданном режиме. Для их определения использована теоретическая диаграмма разгона [6].

По предложенной схеме независимого экономичного вала отбора мощности разработана конструкция для трактора "Беларус 2522", изготовлен опытный образец и проведены заводские испытания на ПО "МТЗ".

В системе управления муфтами и тормозом ВОМ использовались стендовая автономная насосная установка производительностью 10—12 л/мин и стендовый клапан-регулятор с фильтром-распределителем 80-1737110. Принципиальная схема стендовой установки приведена на рис. 5.

В муфтах M_n и M_B было по 14 пар трения, в тормозе Т — две пары трения. В качестве фрикционных дисков в муфтах и тормозе использовались диски с накладками из материала "Шадеф". Управление муфтами и тормозом ВОМ осуществлялось электрогидравлическим распределителем 2522-4212010 и блоком комплексной электронной системы управления (КЭСУ) по ТУ ВУ 190431397.011—2006. В качестве приводного электродвигателя использовалась балансирная машина IDS 1146 мощностью 296 кВт, в качестве нагрузителя — маховые массы с моментом инерции 18—18,5 кг·м².

Работоспособность ВОМ оценивалась по его способности передавать вращение во включенном состоянии каждой из ступеней, т. е. осуществлять разгон маховых масс стенда и обеспечивать их остановку при включении тормоза, сохраняя при этом фрикционные и промежуточные диски ФМ и тормоза в работоспособном состоянии. Один из графиков процесса переключения на стенде с муфты низшей ступени ВОМ на высшую приведен на рис. 6.

Утечки масла по уплотнительным кольцам муфт и тормоза ВОМ при температуре масла 20—25 °С и давлении 1,4 МПа составляли: в муфте низшей ступени 0,7—0,8 л/мин; в муфте высшей ступени 0,8—1 л/мин; в тормозе 0,7—0,8 л/мин. Расход масла на смазку и охлаждение дисков муфт и тормоза ВОМ при температуре масла 20—25 °С и давлении 0,22 МПа составлял 5,5—5,6 л/мин. В условиях проведения стендовых

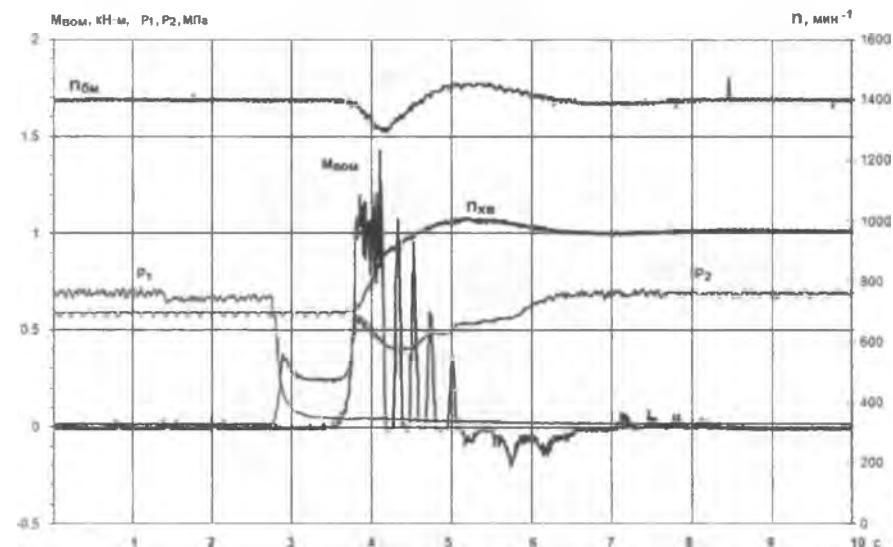


Рис. 6. Процесс переключения на стенде с муфты нижней ступени ВОМ на высшую на частоте вращения входного вала 1400 мин^{-1} при давлении в системе управления $1,4 \text{ МПа}$ с использованием КЭСУ:

p_1, p_2 — давление масла в канале управления муфтой нижней и высшей ступеней ВОМ, МПа; $M_{\text{ВОМ}}$ — вращающий момент на хвостовике ВОМ, кН·м; $n_{\text{ХВ}}, n_{\text{БМ}}$ — частоты вращения хвостовика ВОМ и вала балансирующей машины, мин^{-1}

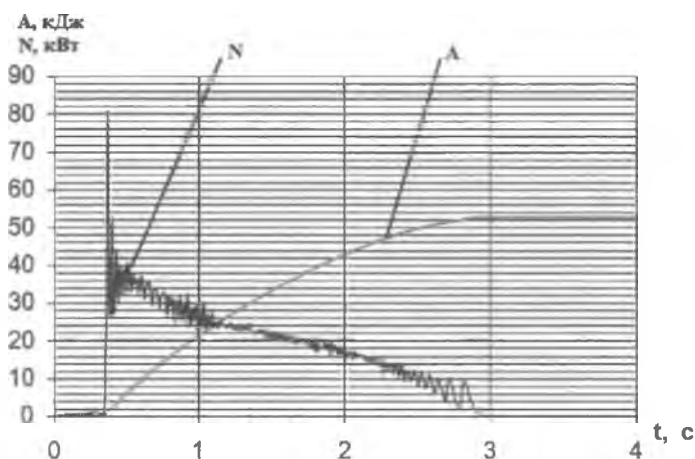


Рис. 7. Графики изменения цикловой работы A и мощности N трения, поглощаемых тормозом ВОМ, при испытаниях ФМ высшей ступени на частоте вращения входного вала 1400 мин^{-1} при давлении в системе управления $1,4 \text{ МПа}$

испытаний при переключении муфты высшей ступени ВОМ на низшую пиковые значения вращающего момента на хвостовике ВОМ достигали: $4000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при давлении масла в системе управления $0,7 \text{ МПа}$; $5600 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при давлении масла $1,4 \text{ МПа}$. Время переходного процесса составляло соответственно $2,6$ и $3,2 \text{ с}$.

При включении муфты нижней ступени ВОМ с использованием КЭСУ пиковые значения вращающего момента на хвостовике ВОМ

достигали $2300 \text{ Н} \cdot \text{м}$, высшей ступени — $1800 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а время переходного процесса составляло 4 с .

По результатам обработки данных получены цикловая работа A и мощность N трения, поглощаемые тормозом ВОМ (рис. 7) при испытаниях фрикционных муфт нижней и высшей ступеней на частоте вращения входного вала 1400 мин^{-1} при давлении в системе управления $1,4 \text{ МПа}$. Цикловая работа трения, поглощаемая фрикционным диском тормоза, при испытаниях ФМ

низшей ступени была в пределах $52\text{--}53 \text{ кДж}$, при испытаниях ФМ высшей ступени — в пределах $99\text{--}100 \text{ кДж}$. Отклонения частоты вращения балансирующей машины при переключениях фрикционов от установившегося значения не превышали 80 мин^{-1} , а хвостовика ВОМ — 50 мин^{-1} в течение 1 секунды .

На данном этапе испытаний ВОМ отработал в полном объеме 500 циклов включений-выключений муфты и тормоза без замечаний, сохранив работоспособность. Температура масла после непрерывной шестичасовой работы стенда составляла $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Представленный на испытания ВОМ 3525-4202010 трактора "Беларус-3522" обеспечивает передачу крутящего момента на каждой из ступеней включения ВОМ.

Перевод на частичный режим работы двигателя трактора "Беларус" класса $5,0$ с установленным двухступенчатым задним валом отбора мощности с переключением фрикционов под нагрузкой позволяет агрегату переменной массы при работе с полуприцепом ПМФ-20 на внесении органических удобрений экономить до 8% топлива, повысить долговечность двигателя и безопасность выполняемых технологических работ.

Список литературы

1. Протасеня О. Н. Выбор рациональных схем и обоснование параметров систем отбора мощности приводов машин (применительно к машинно-тракторным агрегатам): Дис. ... канд. техн. наук. — Минск, 1991.
2. Vernet J. Prise de force 750 tours de Fendt // Tracteurs et Machines Agricoles. — 1983, № 805.
3. Объемные гидромеханические передачи. Расчет и конструирование / О. М. Бабаев и др.; под общ. ред. Е. С. Кисточкина. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987.
4. Шарипов В. М. Конструирование и расчет тракторов. — М.: Машиностроение, 2004.
5. Исследование стабильности ВОМ двухпоточного привода с планетарным регулируемым редуктором / А. И. Бобровник и др. // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2013, № 3.
6. Переключение передач на экономичный режим независимого вала отбора мощности / А. И. Бобровник и др. // Вестник Белорусско-Российского университета. — 2013, № 3.