

# НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ НА ТРАКТОРАХ БЕЗ РАЗРЫВА ПОТОКА МОЩНОСТИ

Тимофиевский А.А.,  
ОАО «НИИ стали»,  
atimskiy@yandex.ru

Статья затрагивает проблемы оптимизации управления процессом переключения передач без разрыва потока мощности. Изложена точка зрения на динамику процесса переключения передач, учитывающая возникновение дефицита крутящего момента на валах при изменении передаточного числа и увеличении потерь на трение в буксующей муфте. Приведены формулы расчета динамических параметров, использованные в математической модели динамики тракторного агрегата при переключении передач без разрыва потока мощности. С помощью математической модели, разработанной в НАТИ для отладки системы электро-гидравлического управления процессом переключения передач трактора ЧН-6, рассчитаны несколько вариантов переключения передач. Особое внимание уделено возникновению, развитию и завершению процесса циркуляции мощности в контуре переключаемых муфт, поскольку отсутствие циркуляции мощности большинство авторов относят к признаку оптимальности переключения. Приведены результаты расчетов в части циркуляции мощности, срыва в буксование выключаемой муфты и замыкания включаемой муфты. Результаты расчетов позволяют сделать выводы, что при замкнутой муфте низшей передачи рост момента в буксующей муфте включаемой высшей передачи вызывает увеличение потерь на трение в дисках, что ведет к понижению частоты вращения вала двигателя и снижению скорости трактора. Величина и длительность падения частоты вращения вала двигателя и скорости трактора малы, но вызванные снижением скорости трактора моменты инерционных сил достаточно велики, и их необходимо учитывать при расчетах. Во всех опытах, где присутствовала циркуляция мощности, она начиналась раньше, чем муфта высшей передачи создавала крутящий момент, соответствующий моменту сопротивления движению. Во всех опытах, где присутствовала циркуляция мощности, она заканчивалась в результате снижения давления в бустере муфты низшей передачи после срыва ее в буксование в режиме циркуляции мощности. Циркулирующая мощность после срыва в буксование и выключения муфты перенаправляется на выходной вал, разгоняя трактор, ускоряя синхронизацию и замыкание включающей муфты.

**Ключевые слова:** трактор, коробка передач, переключение передач, поток мощности, буксование фрикционной муфты, математическая модель.

## Введение

Одной из задач импортозамещения является производство отечественных сельскохозяйственных тракторов высокого тягового класса. При этом неизбежно возникнет вопрос освоения электрогидравлического управления процессом переключения передач без разрыва потока мощности.

Разработка такого управления сопряжена с решением двух задач: формирование программ изменения давления в переключаемых муфтах и реализация этих программ средствами электроники. Если в решении второй задачи имеется определенный опыт в автостроении, то решение первой требует проведения большого

объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для освоения способа оптимального управления процессом переключения передач.

## Цель исследования

Разработка оптимального управления переключением передач требует отчетливого знания процесса, происходящего в трансмиссии при переключении. Целью данной статьи является ознакомление разработчиков систем управления переключением передач с особенностями протекания процесса, выявленными при математическом моделировании переключения.

### Методы математического моделирования процесса переключения передач

Понятия «оптимальное перекрытие» и «условия безразрывности» приведены в работе К.Я. Львовского [1]: «Перекрытие передач называется оптимальным, если выполняются два условия:

а) условие безразрывности, т.е. в процессе перекрытия сумма приведенных к ведомому валу узла моментов трения муфт должна быть больше момента  $M_c$  сопротивления вращению ведомого вала:

$$M_{k-1}^T \cdot i_{k-1}^{BM} + M_k^T \cdot i_k^{BM} > M_c,$$

где  $M_{k-1}^M$  и  $M_k^M$  – моменты трения соответственно выключаемой  $\Phi_{k-1}$  и включаемой  $\Phi_k$  муфт;

б) перекрытие заканчивается, когда момент трения включаемой муфты  $\Phi_k$ , приведенный к ведомому валу узла ( $M_k^T \cdot i_k^{BM}$ ), увеличиваясь, достигнет значения, равного моменту сопротивления  $M_c$ ».

Там же [1] принимается допущение: «Если на 1-ом этапе двигатель работает на регуляторной ветви характеристики, то частоту вращения вала двигателя можно принять постоянной». Альтернативный вариант не рассматривается. Там же [1]: «...оптимальное перекрытие характеризуется... отсутствием циркуляции мощности».

Такая же позиция высказывается группой авторов в работе [2]. Кроме того, в этой статье утверждается, что процесс переключения передач в КП без разрыва потока мощности происходит при буксовании дисков муфты включаемой передачи и замкнутых дисках выключаемой.

Описание процесса переключения передач, изложенное в работе [3], аналогично рассмотренным ранее. Отличием можно считать то, что завершение перекрытия авторы относят к падению до нуля крутящего момента, передаваемого муфтой  $\Phi_{k-1}$ . Это нельзя считать противоречащим ранее заявленному, поскольку было принято, что создание муфтой  $\Phi_k$  крутящего момента, соответствующего моменту сопротивления движению, совпадает по времени с падением до нуля момента в муфте  $\Phi_{k-1}$ .

Комплекс формул, предложенный К.Я. Львовским [1], как и две другие указанные работы [2, 3], были нацелены на расчет работы трения в переключаемых муфтах.

В работах [4] и [5] получило развитие математическое моделирование процесса переключения передач. Вместе с тем, следует считать спорным вывод, что в диапазоне угловых скоростей от  $\omega_{k-1}$  до  $\omega_k$  при переключении передач работает только одна муфта  $\Phi_k$ .

Исходная позиция, принятая в НАТИ при разработке управления переключением передач для трактора ЧН-6, заключалась в следующем.

В процессе переключения передач участвуют двигатель, нагрузка (момент сопротивления движению), включаемая и выключаемая муфты и моменты инерции входного вала и выходного вала. Крутящий момент двигателя  $M_d$  может изменяться во время переключения под воздействием дисбаланса крутящих моментов на входном вале, но это изменение требует определенного времени. Момент сопротивления движению  $M_c$  принято считать постоянной величиной. Включаемая муфта  $\Phi_k$  играет основную роль в протекании процесса переключения передач, определяя поведение выключаемой муфты  $\Phi_{k-1}$  и двигателя. Инерционные массы, соединенные с входным валом и с выходным валом поддерживают баланс моментов на валах, замедляя движение в случае дефицита крутящего момента, или ускоряя, в случае его избытка.

Переключение передач «вверх» предполагает рост давления во включаемой муфте  $\Phi_k$  высшей передачи и снижение давления в выключаемой муфте  $\Phi_{k-1}$  низшей передачи.

Момент, создаваемый буксующей муфтой, зависит только от давления в ее цилиндре, в то время как замкнутая муфта может передавать любой момент в пределах, определяемых давлением в ее цилиндре. При повышении давления в муфте  $\Phi_k$ , она увеличивает отбор с входного вала крутящего момента за счет снижения крутящего момента, поступающего на муфту  $\Phi_{k-1}$ . Если перешедший со входа муфты  $\Phi_{k-1}$  на вход муфты  $\Phi_k$  момент  $\Delta M$ , в первом случае создавал на выходном вале момент  $\Delta M \cdot i_{k-1}$ , то во втором случае создаваемый момент снижается до  $\Delta M \cdot i_k$ . Это ведет к уменьшению суммы крутящих моментов, поступающих на выходной вал от муфт  $\Phi_{k-1}$  и  $\Phi_k$ , т.е. к возникновению дефицита крутящего момента, который компенсируется моментом, создаваемым инерционными силами при замедлении тракторного агрегата.

Дефицит крутящего момента усугубляется потерями на трение в буксующей муфте  $\Phi_k$ .

Более быстрое падение момента, передаваемого муфтой  $\Phi_{k-1}$  на выходной вал, по сравнению с ростом момента создаваемого муфтой  $\Phi_k$ , приводит к тому, что передаваемый муфтой  $\Phi_{k-1}$  момент снижается до 0 раньше, чем создаваемый муфтой  $\Phi_k$  момент достигнет величины, соответствующей моменту сопротивления движению  $M_c$ . Дальнейший рост момента, создаваемого муфтой  $\Phi_k$  ведет к возникновению и усилению циркуляции мощности в контуре муфт  $\Phi_{k-1}$  и  $\Phi_k$ .

Снижение давления в муфте  $\Phi_{k-1}$  и соответственно уменьшение ее «передающих возможностей» одновременно с ростом момента циркулирующей через муфту мощности, ведут к срыву муфты  $\Phi_{k-1}$  в буксование. Входной и выходной валы получают самостоятельную динамику и связаны друг с другом через пару буксующих муфт. После срыва в буксование величина циркулирующего потока мощности определяется возможностями муфты  $\Phi_{k-1}$ . Падение давления до 0 в муфте  $\Phi_{k-1}$  прекращает циркуляцию мощности. Существовавший дефицит крутящего момента разделяется между валами. Сразу после срыва в буксование муфты  $\Phi_{k-1}$  выходной вал может терять обороты, но освободившаяся от циркуляции мощность быстро создает на нем избыточный крутящий момент и тракторный агрегат начинает разгоняться. На входном вале, вследствие сокращения и исчезновения циркуляции мощности, питавшей муфту  $\Phi_k$ , дефицит момента возрастает, что требует от двигателя роста выдаваемого им крутящего момента за счет падения оборотов. Замедление входного вала и ускорение выходного вала ведут к синхронизации вращения ведущих и ведомых дисков муфты  $\Phi_{k-1}$  и ее замыканию.

Формулы баланса крутящего момента приведены ниже.

Если буксуют обе муфты, баланс моментов определяется следующими формулами:

- для входного вала:

$$M_d - M_{k-1} / i_{dk-1} - M_k / i_{dk} - \dot{\omega}_d \cdot J_d = 0, \quad (1)$$

где  $M_{k-1}$  – крутящий момент, развиваемый муфтой  $\Phi_{k-1}$ ;  $i_{dk-1}$  – передаточное число трансмиссии на участке от входного вала до муфты  $\Phi_{k-1}$ ;  $M_k$  – крутящий момент, развиваемый муфтой  $\Phi_k$ ;  $i_{dk}$  – передаточное число трансмиссии на участке от входного вала до муфты  $\Phi_k$ ;  $\dot{\omega}_d$  – угловое ускорение входного вала;  $J_d$  – момент инерции входного вала

в сумме с приведенными к нему моментами инерции связанных с ним вращающихся узлов и деталей трансмиссии и двигателя;

- для выходного вала:

$$M_{k-1} \cdot i_{k-1c} + M_k \cdot i_{kc} - \dot{\omega}_c \cdot J_c - M_c = 0, \quad (2)$$

где  $i_{k-1c}$  – передаточное число трансмиссии на участке от муфты  $\Phi_{k-1}$  до выходного вала;  $i_{kc}$  – передаточное число трансмиссии на участке от муфты  $\Phi_k$  до выходного вала;  $\dot{\omega}_c$  – угловое ускорение выходного вала;  $J_c$  – момент инерции выходного вала в сумме с приведенными к нему моментами инерции, связанных с ним вращающихся узлов и деталей трансмиссии и ходовой системы, а также приведенного момента инерции поступательно движущихся масс тракторного агрегата;  $M_c$  – приведенный к выходному валу момент сопротивления движению;

- для всей трансмиссии, при условии, что  $\Phi_{k-1}$  замкнута:

$$M_d - M_c / i_{k-1} - N_k / \omega_d - \dot{\omega}_d \cdot J_{dc(k-1)} = 0 \quad (3)$$

где  $i_{k-1}$  – передаточное число трансмиссии при замкнутой муфте  $\Phi_{k-1}$ ;  $N_k$  – мощность тепловых потерь в буксующей муфте  $\Phi_k$ ;  $\dot{\omega}_d$  – угловая скорость входного вала;  $J_{dc(k-1)}$  – приведенный к входному валу суммарный момент инерции входного и выходного валов.

Подводя итог изложенному выше, можно сказать, что нет согласия с позицией К.Я. Львовского [1] по следующим пунктам:

- «условие безразрывности», выраженное неравенством

$$M_{k-1}^T \cdot i_{k-1}^{BM} + M_k^T \cdot i_k^{BM} > M_c;$$

- падение момента, передаваемого выключаемой муфтой  $\Phi_{k-1}$ , происходит в том же темпе, что и рост момента во включаемой муфте  $\Phi_k$  [1].

Кроме того, условие, что в процессе переключения передача давление во включаемой муфте растет до максимального прямо пропорционально времени переключения, противоречит принципу электрогидравлического управления переключением, при котором давления в муфтах ограничиваются определенными значениями, а изменение давления имеет экспоненциальный характер.

Также представляется необходимым уточнение понятий «перекрытие» и «безразрывность переключения». В большинстве формул расчета параметров, приведенных К.Я. Львовским, предполагается, что муфта  $\Phi_{k-1}$  в период

перекрытия остается замкнутой. Вместе с тем в исходном неравенстве [1] ведется расчет, исходящий из условия, что обе муфты буксуют. Причем, превышение суммы моментов, приведенных к выходному валу, над моментом сопротивления движению, заявляется как условие безразрывности.

Требуется проверка утверждения, что оптимальное перекрытие характеризуется отсутствием циркуляции мощности.

В свое время в НАТИ при работах над электрогидравлической системой управления, для расчета зависимости динамики тракторного агрегата от программы изменения давления в переключаемых муфтах, была разработана математическая модель процесса переключения передач на тракторе ЧН-6. Подробное описание математической модели является отдельной темой. Здесь будет достаточно кратко ее описание и некоторых формул, по которым рассчитывается динамическое состояние двигателя, трансмиссии и тракторного агрегата.

Математическая модель включает три крупных блока: исходной информации, расчета начальных значений переменных параметров и расчетный цикл динамических параметров, который считает изменения параметров за интервал времени  $\Delta t$  равный 1 миллисекунде (мс). Задача цикла – рассчитать изменившиеся за 1 мс значения ускорений и скоростей валов трансмиссии, а также рассчитать значения крутящих моментов, передаваемых валами и муфтами.

Инициативным параметром является давление в переключаемых муфтах, которое изменяется, стремясь достичь значения, заданного «Программой изменения давления». Цикл расчета процесса переключения передач начинается с определения изменения давления в переключаемых муфтах, изменения крутящего момента, который может передать замкнутая муфта или создает буксующая муфта, при этом определяется мощность тепловых потерь в ней.

Простое переключение вверх включает три фазы (в отличие от двухпарного, которое имеет, по крайней мере, пять фаз из девяти возможных). Первая фаза – муфта низшей передачи замкнута, муфта высшей передачи буксует. Вторая фаза – синхронизация дисков во включаемой муфте, при этом буксуют обе переключаемые муфты. Третья фаза – муфта высшей передачи замкнута, муфта низшей передачи буксует.

Для каждой из фаз, динамика процесса переключения передач рассчитывается по разным группам формул.

### Формулы первой фазы процесса переключения передач

Определяется суммарный момент инерции, приведенный к входному валу коробки передач при замкнутой муфте  $\Phi_{k-1}$ :

$$J_{\text{дс}(k-1)} = J_{\text{д}} + \frac{J_{\text{с}}}{i_{k-1}^2}.$$

Определяется ускорение входного вала:

$$\omega_{\text{д}} = (M_{\text{д}} - M_{\text{с}} / i_{k-1} - N_{\text{к}} / \omega_{\text{д}}) / J_{\text{дс}(k-1)}.$$

Данная формула является преобразованием формулы (3).

Определяется ускорение выходного вала:

$$\omega_{\text{с}} = \omega_{\text{д}} / i_{k-1}.$$

Определяется ускорение трактора:

$$a_{\text{тр}} = \omega_{\text{с}} \cdot R_{\text{с}}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{с}}$  – радиус приведения нагрузки, значение которого указано в исходных данных.

Определяется момент инерционных сил тракторного агрегата, приведенный к входному валу:

$$M_{\text{дс}j} = \omega_{\text{д}} \cdot J_{\text{дс}(k-1)}.$$

Определяется момент инерционных сил входного вала:

$$M_{\text{д}j} = \omega_{\text{д}} \cdot J_{\text{д}}. \quad (5)$$

Определяется момент, передаваемый муфтой  $\Phi_{k-1}$ :

$$M_{k-1} = (M_{\text{д}} - M_{\text{к}} / i_{\text{дк}} - M_{\text{д}j}) \cdot i_{\text{д}k-1}. \quad (6)$$

Формула (6) завершает определение значений параметров одного расчетного шага, а начиная с формулы (7) ведется расчет значений параметров следующего расчетного шага.

Определяется новая угловая скорость входного вала:

$$\omega_{\text{д}} = \omega_{\text{д}} + \omega_{\text{д}}' \cdot \Delta t. \quad (7)$$

Определяется угловая скорость выходного вала:

$$\omega_{\text{с}} = \omega_{\text{д}} / i_{k-1}.$$

Определяется скорость трактора, (км/час):

$$V_{\text{тр}} = 3,6 \cdot \omega_{\text{с}} \cdot R_{\text{с}}. \quad (8)$$

Давление в выключаемой муфте снижается, поэтому на каждом шаге проверяется возможность муфты  $\Phi_{k-1}$  передавать поступающий на нее момент. Если передача становится невозможной, фиксируется срыв муфты в буксование. Далее, создаваемый муфтой  $\Phi_{k-1}$  момент определяется по давлению в муфте, и для дальнейшего расчета динамики используется другая группа формул.

### **Формулы для второй фазы процесса переключения передач**

Определяется ускорение входного вала:

$$\dot{\omega}_d = (M_d - M_{k-1} / i_{dk-1} - M_k / i_{dk}) / J_d. \quad (9)$$

Определяется ускорение выходного вала:

$$\dot{\omega}_c = (M_{k-1} \cdot i_{k-1c} + M_k \cdot i_{kc} - M_c) / J_c. \quad (10)$$

Формулы (9) и (10) получены преобразованием формул (1) и (2).

По формуле (5) определяется момент инерционных сил, приведенный к входному валу.

Определяется момент инерционных сил, приложенный к выходному валу:

$$M_{cj} = \dot{\omega}_c \cdot J_c.$$

По формуле (7) определяется угловая скорость входного вала.

Определяется угловая скорость выходного вала:

$$\omega_c = \omega_c + \dot{\omega}_c \cdot \Delta t.$$

По формулам (4) и (8) определяются ускорение и скорость трактора.

Проверяется замыкание буксующей муфты  $\Phi_k$ . Для этого запоминается предшествующее значение относительной угловой скорости дисков:

$$\omega_k^{os} = \omega_k^o.$$

Определяется новое значение относительной скорости дисков:

$$\omega_k^o = \omega_d / i_{dk} - \omega_c \cdot i_{kc}.$$

Изменение знака параметра  $\omega_k^o$  по отношению к знаку  $\omega_k^{os}$  означает синхронизацию дисков и замыкание муфты  $\Phi_k$ .

### **Формулы для третьей фазы процесса переключения передач**

Для третьей фазы используется набор формул первой фазы при взаимной замене индексов муфт  $\Phi_{k-1}$  и  $\Phi_k$ .

Для анализа характера протекания процесса переключения с низшей передачи на высшую была выполнена серия виртуальных переключений с использованием математической модели процесса переключения передач.

Поскольку математическая модель привязана к трактору ЧН-6, то далее используются обозначения, принятые в кинематической схеме трансмиссии.

Трансмиссия трактора имела 16 передач, переключаемых без разрыва потока мощности. Из 15 переключений 5 были двухпарными, а 10 простыми (однопарными).

Трансмиссия включает узел передач и узел диапазонов. В узле передач установлены фрикционные муфты передач Ф1, Ф2, Ф3 и Ф4 (номер муфты соответствует номеру передачи), а также муфта передач заднего хода Ф5. Все муфты при замыкании осуществляют связь между входным и промежуточным валами. В узле диапазонов установлен планетарный ряд с фрикционным тормозом ТА, который, включая 1-ый диапазон, замыкает на корпус эпицикл, а также фрикционные муфты ФБ, ФВ и ФГ, второго, третьего и четвертого диапазонов, соответственно. Все эти муфты и планетарный ряд установлены на выходном валу и обеспечивают его связь с промежуточным валом.

Для расчетов на модели были выбраны три варианта нагрузки:

- трактор без нагрузки;
- трактор с плугом, создающим рабочее усилие 70 кН;
- трактор с прицепом массой 20 т.

Для проведения расчетов была использована математическая модель, доработанная под отладку экспериментальных алгоритмов формирования гибких программ изменения давления. (Описание этих алгоритмов является отдельной темой.)

Регистрировались значения следующих параметров:

- расчетного времени, мс;
- индикатора включенной передачи;
- индикатора включенного диапазона;
- давления в выключаемой муфте, бар;
- давления во включаемой муфте, бар;
- крутящего момента в выключаемой муфте, Н·м;
- крутящего момента во включаемой муфте, Н·м;
- момента инерционных сил, Н·м;
- работы трения в выключаемой муфте, Н·м;

- работы трения во включаемой муфте, Н·м;
- частоты вращения вала двигателя, мин<sup>-1</sup>;
- крутящего момента, развиваемого двигателем, Н·м;
- ускорения вала двигателя, рад/с<sup>2</sup>;
- ускорения ведущих дисков выключаемой муфты (после срыва в буксование), рад/с<sup>2</sup>;
- ускорения ведомых дисков выключаемой муфты (после срыва в буксование), рад/с<sup>2</sup>;
- ускорения трактора, м/с<sup>2</sup>;
- скорости трактора, км/ч.

Значения всех этих параметров выводились на печать после каждого расчетного цикла, т.е. через каждую миллисекунду времени процесса переключения передач.

Следует указать, что программы изменения давления включают два этапа: этап подготовки муфт к переключению и этап управления переключением. Отсчет времени начинается с момента выдачи оператором команды на переключение. На подготовку муфт отводится 0,6 с; управление переключением передач начинается с 600-ой мс.

Подготовка к переключению имеет целью приблизить процесс переключения к оптимальному. Для этого давление в выключаемой муфте во время подготовки снижалось до уровня немного превышающего уровень, необходимый для передачи крутящего момента, соответствующего  $M$ , а в начале управления переключением давалась команда на сброс давления до нуля. Заданное давление во включаемой муфте при начале управления переключением устанавливалось на уровне, обеспечивающем разгон тракторного агрегата с требуемым ускорением. Экспериментальный алгоритм предусматривал ограничение ускорения выходного вала коробки передач, величиной 60 рад/с<sup>2</sup>, что соответствует ускорению данного трактора 1,64 м/с<sup>2</sup>.

Рабочее давление гидросистемы – 19 бар.

### **Особенности каждого из переключений и их обсуждение**

#### **Опыт № 1**

Трактор без нагрузки. Приведенный к выходному валу момент сопротивления движению – 236,2 Н·м; приведенный момент инерции – 11 кг·м<sup>2</sup>.

Переключение с 1-ой на 2-ю передачу заднего хода. Соотношение передаточных чисел

равно 2,73. Силовой поток переключается в узле диапазонов с ТА на ФБ; в узле передач постоянно замкнута муфта Ф5.

Программа изменения давлений предусматривала установку давлений в период подготовки: для ТА – 2,53 бар, для ФБ – 2,24 бар; при управлении переключением: для ТА – 0 бар, для ФБ – 4,44 бар.

Тормоз ТА обеспечивает передачу на выходной вал максимальной нагрузки. Его характеристика – увеличение предельного крутящего момента на выходном валу на 626 Н·м, при увеличении давления в бустере на 1 бар, в то время как у незагруженного трактора момент сопротивления движению, приведенный к выходному валу, составляет 236 Н·м.

Циркуляция мощности отсутствовала.

Малейшее снижение давления в бустере ТА привело на 601-ой мс к срыву тормоза в буксование и на 604 мс к его выключению. Перед выключением ТА ФБ передавал на выходной вал крутящий момент равный 128 Н·м. Дефицит крутящего момента, равный 108 Н·м, восполнялся инерционными силами за счет замедления трактора.

Максимальное ускорение – 1,7 м/с<sup>2</sup>. Превышение заданного значения объясняется возросшим центробежным давлением в ФБ, вследствие увеличения скорости ее вращения более чем в 2,7 раза.

ФБ замкнулась на 1159 мс при крутящем моменте 1107 Н·м. и скорости трактора 4,9 км/ч. Скорость трактора продолжала увеличиваться до 5 км/ч за счет роста частоты вращения вала двигателя. Скорость перед переключением была 1,84 км/ч и после отключения ТА снижалась до 1,83 км/ч.

Работа трения в ФБ составила 932 Н·м.

Математическая модель предусматривала возможность ввода любой программы изменения давлений в муфтах. Для сравнения с выполненным расчетом был произведен расчет варианта с программой изменения давлений, обеспечивающей «оптимальное» переключение – значение заданного давления подготовки ТА к переключению было увеличено до 2,9 бар. Срыв ТА в буксование произошел при крутящем моменте, создаваемом муфтой ФБ, равном 224 Н·м и моменте инерционных сил 12 Н·м. Результаты проведенного ранее и «оптимального» расчета, в части длительности переключения и работы трения в муфте, практически не отличались.

**Опыт № 2**

Трактор без нагрузки. Приведенный к выходному валу момент сопротивления движению – 236,2 Н·м; приведенный момент инерции – 11 кг·м<sup>2</sup>.

Переключение со 2-ой на 3-ю передачу заднего хода. Соотношение передаточных чисел равно 2,78. Силовой поток переключается в узле диапазонов с ФБ на ФГ; в узле передач постоянно замкнута муфта Ф5.

Программа изменения давлений предусматривала установку давлений в период подготовки: для ФБ – 2,7 бар, для ФГ – 2,21 бар; при управлении переключением: для ФБ – 0 бар, для ФГ – 7,38 бар.

Циркуляция мощности началась на 607 мс и закончилась на 608 мс выключением муфты ФБ. Циркуляция началась при величине крутящего момента, создаваемого муфтой ФГ, 176 Н·м. Момент инерционных сил составил 60 Н·м.

Максимальное ускорение – 1,84 м/с<sup>2</sup>. Превышение заданного значения определяется возросшим центробежным давлением в муфте ФГ вследствие увеличения скорости ее вращения еще более чем в 2,7 раза.

Муфта ФГ замкнулась на 1931 мс при скорости трактора 12,95 км/ч. Скорость продолжала увеличиваться до 13,77 км/ч за счет роста частоты вращения вала двигателя. Начальная скорость была 5 км/ч и не снижалась в процессе переключения передач.

Работа трения в муфте ФГ составила 6166 Н·м.

Процесс переключения можно считать оптимальным.

**Опыт № 3**

Трактор с плугом, создающим рабочее усилие 70 кН. Момент сопротивления движению, приведенный к выходному валу коробки передач, составляет 2147 Н·м, момент инерции – 13,56 кг·м<sup>2</sup>.

Переключение с 5-ой на 6-ю передачу выполняется переключением в узле диапазонов муфт ФБ и ФВ при включенной в узле передач муфте Ф1.

Программа изменения давления предусматривает во время подготовки к переключению установку давления 7 бар в муфте ФБ и 2,15 бар в муфте ФВ. При управлении переключением: давление в муфте ФБ – 0 бар; в муфте ФВ назначается давление 9,69 бар.

Циркуляция мощности началась на 643 мс и закончилась на 646 мс выключением муфты. Циркуляция началась при крутящем моменте, создаваемом муфтой ФВ, равном 2115 Н·м. Момент инерционных сил составил 32 Н·м. Максимальное ускорение – 1,62 м/с<sup>2</sup>.

Муфта ФВ замкнулась на 798 мс при скорости трактора 5,97 км/ч. Скорость продолжала увеличиваться до 6,06 км/ч за счет роста частоты вращения вала двигателя. Начальная скорость была 5,3 км/ч и в процессе переключения передач снижалась до 5,29 км/ч.

Работа трения в муфте ФВ составила 251 Н·м.

**Опыт № 4**

Нагрузка трактора и переключаемые муфты диапазонов те же, что в опыте № 3. В узле передач включена муфта Ф4 вместо Ф1, что дает переключение с 11-ой передачи на 12-ю.

Это переключение вызывает особый интерес, поскольку происходит при работе двигателя на участке постоянной мощности корректорной ветви характеристики, на режиме близком к максимальной нагрузке.

Циркуляция мощности возникает на 640-ой мс при крутящем моменте, развиваемом муфтой ФВ, равном 2010 Н·м, и моменте инерционных сил, равном 138 Н·м.

Муфта ФБ срывается в буксование на 644 мс. Циркуляция мощности заканчивается на 650-ой мс. Крутящий момент, создаваемый в это время муфтой ФВ, составлял 2277 Н·м, а момент инерционных сил 130 Н·м. Максимальное ускорение – 1,62 м/с<sup>2</sup>.

Муфта ФВ замкнулась на 788 мс при развиваемом ею крутящем моменте 3132 Н·м, из которых на долю двигателя приходилось только 2039 Н·м, а остальное обеспечивали инерционные силы момента инерции узла входного вала. Момент, развиваемый двигателем, оказался недостаточным для обеспечения дальнейшего разгона или равномерного движения тракторного агрегата, скорость которого стала падать. При замыкании муфты ФВ двигатель имел 1831 об/мин, а скорость трактора была 10,8 км/ч. При тяге 70 кН, установившемся движению соответствуют 1732 мин<sup>-1</sup> двигателя и скорость 10,21 км/ч.

Работа трения в муфте ФВ составила 456 Н·м.

**Опыт № 5**

Нагрузка трактора – прицеп массой 20 т. Момент сопротивления движению, приве-

денный к выходному валу коробки передач, – 879 Н·м; момент инерции тракторного агрегата – 25,9 кг·м<sup>2</sup>.

Переключение с 3-ей передачи на 4-ю. Для этого переключаются муфты Ф3 и Ф4 узла передач, при постоянно включенном тормозе ТА узла диапазонов (1-ый диапазон).

Программа изменения давления предусматривает во время подготовки к переключению установку давления 1,9 бар в муфте Ф3, и 1,05 бар в муфте Ф4. При управлении переключением: заданное давление в муфте Ф3 – 0 бар; в муфте Ф4 назначается давление 5,49 бар.

Циркуляция мощности возникает на 609-ой мс при крутящем моменте, развиваемом муфтой Ф4 155 Н·м (852 Н·м на выходном валу), и моменте инерционных сил, равном 27 Н·м.

Муфта Ф3 срывается в буксование на 613 мс. Циркуляция мощности заканчивается на 623-ей мс. Крутящий момент, создаваемый в это время муфтой Ф4, составлял 320 Н·м.

Максимальное ускорение – 1,58 м/с<sup>2</sup>.

Муфта Ф4 замкнулась на 779 мс при развиваемом ею крутящем моменте 707 Н·м, (3880 Н·м на выходном валу). Начальная скорость трактора была равна 3,29 км/час. При замыкании муфты Ф4 скорость трактора была 4,05 км/ч; после замыкания муфты трактор продолжил разгоняться до скорости 4,17 км/ч.

Работа трения в муфте Ф4 составила 262 Н·м.

### Опыт № 6

Нагрузка трактора и переключаемые муфты те же, что и в опыте № 5 (момент сопротивления движению, приведенный к выходному валу – 879 Н·м). Постоянно включенная в узле диапазонов муфта Ф4 определяет переключение с 15-ой передачи на 16-ю.

Циркуляция мощности возникает на 616-ой мс при крутящем моменте, развиваемым муфтой Ф4, равном 980 Н·м (703 Н·м на выходном валу) и моменте инерционных сил равном 176 Н·м.

Муфта Ф3 срывается в буксование на 626 мс. Циркуляция мощности заканчивается на 670-ой мс при крутящем моменте, создаваемом муфтой Ф4 2425 Н·м, и моменте инерционных сил – 860 Н·м.

Максимальное ускорение – 1,08 м/с<sup>2</sup>. Заданное ускорение не могло быть достигнуто, так как требовало давления в муфте, превышающего максимальное давление в гидросистеме.

Муфта Ф4 замкнулась на 761 мс при развиваемом ею крутящем моменте 2813 Н·м, (2032 Н·м на выходном валу).

Начальная скорость трактора была равна 23,56 км/ч. При замыкании муфты Ф4 скорость трактора была 23,93 км/ч; после замыкания муфты трактор продолжил разгоняться до скорости более 24 км/ч.

Работа трения в муфте Ф4 составила 974 Н·м.

Наиболее интересные результаты расчетов были сведены в табл. 1. Таблица иллюстрирует разнообразие условий переключения передач и влияние этих условий на протекание процесса.

Возникает вопрос какое переключение можно назвать оптимальным: то, в котором нет циркуляции мощности, но муфта  $\Phi_{k-1}$  отключается раньше, чем муфта  $\Phi_k$  создаст крутящий момент, соответствующий  $M_c$ , или то, в котором нужный крутящий момент создается, но присутствует циркуляция мощности.

Для ответа на этот вопрос были выполнены расчеты переключения с 9-ой на 10-ю передачу трактора, агрегатированного плугом с рабочим усилием 70 кН. Были просчитаны три варианта: программа изменения давления в муфтах, обеспечивающая отсутствие циркуляции, программа, обеспечивающая выключение муфты  $\Phi_{k-1}$  при достижении значения крутящего момента в муфте  $\Phi_k$ , соответствующего моменту сопротивления движению; программа, сформированная бортовым алгоритмом. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Результаты этих расчетов позволяют предположить, что вариант с циркуляцией мощности может оказаться предпочтительней, чем вариант с преждевременным выключением муфты низшей передачи.

И еще пара спорных моментов, затронутых в различных работах.

В большинстве работ циркуляция мощности рассматривается, как сброс с выходного вала излишнего крутящего момента, передаваемого на этот вал буксующей муфтой  $\Phi_k$ . Расчеты показывают, что причиной циркуляции является дефицит крутящего момента на входном вале. Двигатель не успевает выдавать крутящий момент, потребляемый муфтой  $\Phi_k$ , которая восполняет дефицит, «отсасывая» недостающий момент через муфту низшей передачи с выходного вала. Ходовая система получает столько, сколько остается на выходном валу, и трактор вынужден терять скорость независимо от того, какой момент поступил на выходной вал.



Таблица 1

Сводная таблица результатов расчетов

Нагрузка	Без нагрузки		Плуг, тяга 70 кН		Прицеп 20 т		
	3X 1 – 2	3X 2 – 3	5 – 6	11–12	3 – 4	15–16	
Переключаемые передачи							
Соотношение передаточных чисел	2,73	2,78	1,15	1,15	1,27	1,27	
Установка максимальных оборотов холостого хода двигателя, мин <sup>-1</sup>	1800	1800	2250	2250	2250	2250	
Начальные обороты двигателя, мин <sup>-1</sup>	1796	1790	2172	1990	2231	2104	
Обороты при срыве $\Phi_{к-1}$ , мин <sup>-1</sup>	1796	1789	2169	1986	2230	2103	
Обороты при замыкании $\Phi_{к}$ , мин <sup>-1</sup>	1754	1665	2129	1831	2154	1679	
Начальная скорость трактора, км/ч	1,84	5,00	5,30	10,20	3,29	23,56	
Скорость при замыкании $\Phi_{к}$ , км/ч	4,90	12,95	5,97	10,80	4,05	23,98	
Время начала циркуляции мощности, мс		607	643	639	608	615	
Время срыва в буксование $\Phi_{к-1}$ , мс	601	607	644	643	612	625	
Время замыкания $\Phi_{к}$ , мс	1160	1932	799	788	779	761	
Максимальное замедление, м/с <sup>2</sup>	-0,21	-0,13	-0,07	-0,24	-0,03	-0,23	
Максимальное ускорение, м/с <sup>2</sup>	1,70	1,84	1,62	1,62	1,58	1,08	
Давление подготовки $\Phi_{к-1}$ , бар	2,53	2,70	7,00	6,74	1,90	7,59	
Давление переключения $\Phi_{к}$ , бар	4,44	7,38	9,09	9,43	5,49	19,00	
Момент сопротивления движению, Н·м	на выходном валу	236	236	2147	2147	879	879
	на $\Phi_{к}$	236	236	2147	2147	160	1217
Крутящий момент на $\Phi_{к}$ при начале циркуляции мощности, Н·м		176	2104	2009	153	984	
		75%	98%	94%	96%	81%	
Момент инерции нагрузки, кг м <sup>2</sup>	11,0	11,0	13,56	13,56	25,9	25,9	
Максимальный момент инерционных сил, Н·м	-19	-66	-43	-146	-35	-212	
Ускорения дисков при срыве $\Phi_{к-1}$ в буксование, ведущих/ведомых, рад/с <sup>2</sup>		-0,26	-6,16	-3,71	-12,0	-14,9	-21,9
		-6,03	-1,25	2,30	-5,33	13,8	-5,91
Задержка разгона после срыва $\Phi_{к-1}$ , мс	8	2	0	2	0	7	
Работа трения муфты $\Phi_{к}$ , Н·м	932	6166	251	456	262	974	

Таблица 2

Сравнение различных вариантов программ изменения давления

Параметры	Оптимизация по отсутствию циркуляции	Оптимизация по моменту в $\Phi_{к}$	По программе алгоритма
Начало циркуляции, время после команды, мс	–	641	641
Момент в $\Phi_{к}$ , Н·м		2056	2056
Момент в $\Phi_{к-1}$ , Н·м;		29	-251
Срыв в буксование $\Phi_{к-1}$ , время после команды, мс	641	643	645
Момент в $\Phi_{к}$ , Н·м	2056	2110	2160
Момент в $\Phi_{к-1}$ , Н·м	0,0	-27	-106
Окончание циркуляции, время после команды, мс		644	648
Замыкание $\Phi_{к}$ , время после команды, мс	813	812	813
Потеря скорости в начале переключения, км/ч	0,02	0,02	0,02
Время разгона до 9,3 км/ч после команды, мс	826	821	828
Работа трения в $\Phi_{к}$ , Н·м	442	438	439

В работе [4] делается вывод, что «в диапазоне угловых скоростей от  $\omega_{k-1}$  до  $\omega_k$  при переключении передач работает только одна включаемая муфта». И сброс давления из выключаемой муфты до нуля, и увеличение давления во включаемой муфте до заданного, не происходят мгновенно. Эти два процесса должны быть согласованы друг с другом, т.е. работают обе муфты.

В качестве пожелания. В настоящее время в различных работах (иногда в одной и той же работе) для описания одного и того же состояния муфт используются различные термины: «включенная», «замкнутая», «работающая», «выключенная», «буксующая». Было бы полезно разработать и узаконить что-то вроде глоссария по трансмиссии и управлению переключением передач.

### Выводы

1. Расчеты показывают, что при замкнутой муфте  $\Phi_{k-1}$  рост момента в буксующей муфте  $\Phi_k$  вызывает увеличение потерь на трение в дисках. Дефицит крутящего момента на входном и выходном валах ведет к понижению частоты вращения вала двигателя и снижению скорости трактора. Изменение этих параметров кратковременно и мало, но является естественным и не должно восприниматься как недостаток системы управления переключением передач.

2. Величина и длительность падения частоты вращения вала двигателя и скорости трактора малы, но вызванные снижением скорости трактора моменты инерционных сил достаточно велики, и их необходимо учитывать при расчетах.

3. Во всех опытах, где присутствовала циркуляция мощности, она начиналась раньше, чем муфта  $\Phi_k$  создавала крутящий момент, соответствующий моменту сопротивления движению.

4. Во всех опытах, где присутствовала циркуляция мощности, она заканчивалась после срыва муфты  $\Phi_{k-1}$  и ее буксования в режиме циркуляции мощности.

5. Циркулирующая мощность после срыва в буксование и выключения муфты  $\Phi_{k-1}$  перенаправляется на выходной вал, разгоняя трактор, ускоряя синхронизацию и замыкание муфты  $\Phi_k$ .

6. Очевидно, что необходима коррекция предложенных К.Я. Львовским [1] понятий «оптимальное перекрытие» и «безразрывность переключения».

### Литература

1. Львовский К.Я., Черпак Ф.А., Серебряков И.Н., Щельцын Н.А. Трансмиссии тракторов. М.: Машиностроение, 1976. 280 с.
2. Шарипов В.М., Дмитриев М.И., Зенин А.С., Маланин И.А., Смирнов И.А. К вопросу о буксовании фрикционных сцеплений при переключении передач без разрыва потока мощности в коробках передач автомобилей и тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 6. С. 5–9.
3. Шарипов В.М., Дмитриев М.И., Зенин А.С., Круглов С.М., Маланин И.А. Определение параметров буксования фрикционных муфт для различных вариантов их установки в тракторных коробках передач при переключении передач без разрыва потока мощности // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 1(15). Т. 1. С. 242–248.
4. Городецкий К.И., Алендеев Е.М., Тимофиевский А.А., Парфенов А.П. Рабочий процесс разгона тракторного агрегата и переключения передач с подвключением фрикционных муфт // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. № 2(16). Т. 1. С. 33–38.
5. Алендеев Е.М. Однопарные переключения ступеней в коробках передач тракторов // Известия МГТУ «МАМИ». 2014. Т. 1. № 2(20). С. 87–92.

### References

1. L'vovskiy K.Ya., Cherpak F.A., Serebryakov I.N., Shchel'tsyn N.A. *Transmissii traktorov* [Tractors transmissions]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1976. 280 p.
2. Sharipov V.M., Dmitriev M.I., Zenin A.S., Malanin I.A., Smirnov I.A. Spinning of friction clutches when shifting gears without torque interruption in gearboxes of automobiles and tractors. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2015. No 6. pp. 5-9 (In Russ.).
3. Sharipov V.M., Dmitriev M.I., Zenin A.S., Kруглов S.M., Malanin I.A. Determination of parameters of spinning of friction clutches for different variants of its installation in tractor gearboxes without torque interruption. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2013. No 1(15). Т. 1. pp. 242-248 (In Russ.).
4. Gorodetskiy K.I., Alendeev E.M., Timofievskiy A.A., Parfenov A.P. Working process of acceleration of tractor unit and gear shifting with friction clutches switching on. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2013. No 2(16). Т. 1. pp. 33-38 (In Russ.).
5. Alendeev E.M. One-tooth switching steps in gearboxes of tractors. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2014. Т. 1. No 2(20). pp. 87-92 (In Russ.).

## PROBLEMS OF PROCESS CONTROL FOR SHIFTING GEARS ON TRACTORS WITHOUT TORQUE INTERRUPTION

**A.A. Timofievskiy**

NII STALI research institute

atimskiy@yandex.ru

*The article considers the problem of optimizing the process control for shifting gears on tractors without torque interruption. The opinion on the dynamics of process control for shifting gears is explained, it takes into account the occurrence of torque deficit in the shafts, when changing gear, and increasing of friction losses in spinning clutch. The formulas for calculating the dynamic parameters used in the mathematical model of the dynamics of the tractor when shifting gears without torque interruption are shown. With the help of the mathematical model developed in Scientific and Research Tractor Institute (NATI) for debugging the system of electro-hydraulic control of gear shifting process for CHN-6 tractor were calculated several variants of gear shifting. Particular attention is given to occurrence, development and completion of the power circulation process in the circuit of switched clutches, because the lack of circulation of power the majority of authors call the basis of optimal switching. The results of the calculations in terms of the circulation of power, failure to slipping of switching off the clutch and interlocking of switched on clutch are shown.*

*Calculation results suggest that when the clutch of lowest gear is closed the torque growth in spinning clutch of switched on top gear causes an increase in friction losses of disks, which leads to a decrease in engine shaft speed and reduction of the tractor speed. The magnitude and duration of fall of the engine speed and the speed of the tractor are low, but due to a decrease in the speed of the tractor the moments of forces inertia are large enough and need to be taken into account in the calculations.*

*In all experiments, where power circulation was present, it started earlier than top gear clutch created torque, which corresponds to the resistance movement.*

*In all experiments, where power circulation was present, it ended as a result of reducing the pressure in the clutch booster of lower gear after its failure to spinning in the power circulation mode. The circulating power after the failure to spinning and clutch switching off is redirected to output shaft accelerating the tractor and accelerating the synchronization and interlocking of switched on clutch.*

**Keywords:** tractor, transmission, gear shifting, power flow, spinning clutch, mathematical model.