

УДК 629.01

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХПОТОЧНОЙ  
ТРАНСМИССИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИРТУАЛЬНОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАКТОРА**

**MATHEMATICAL MODEL OF A TWO-FLOW TRANSMISSION  
FOR THE SYSTEM OF COMPUTER SIMULATION AND VIRTUAL  
DESIGN OF UNMANNED TRACTOR**

**Таяновский Г. А.**, канд. техн. наук, доц.,  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь  
G. Tayanousky, Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
Belarusian national technical University, Minsk, Belarus

*С учетом тенденций развития концепции современных автономных тракторов и решаемых проектных задач их динамики разработана математическая модель двухпоточной трансмиссии для анализа ее работы в составе трактора с комплексной системой автоматического управления.*

*Taking into account the development trends of modern autonomous tractors and the design problems of their dynamics to be solved, a mathematical model of a two-line transmission has been developed to analyze its operation as part of a tractor with an integrated automatic control system.*

**Ключевые слова:** трактор беспилотный, двухпоточная трансмиссия, математическая модель.

**Keywords:** unmanned tractor, two-line transmission, mathematical model.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Концепция бесступенчатой технологии привода колес и активных рабочих органов (АРО) путем использования в трансмиссиях тракторов модулей объемных двухпоточных гидромеханических передач (ОГМП) с внешним разделением мощностей на основе планетарных механизмов и объемных гидropередач (ОГП), а также электромеханических двухпоточных приводов, получает все боль-

шее распространение, благодаря преимуществам такой технологии по возможностям управления, повышения производительности, экономичности и других свойств машинных тракторных агрегатов (МТА) [1; 2].

В статье приведены результаты разработки динамической и математической модели МТА для выполнения компьютерного моделирования ее процессов как части виртуального проектирования и анализа вариантов инновационных структурно-компоновочных решений базовой беспилотной модели трактора с двухпоточным трансмиссионным модулем (ДТМ) в трансмиссии.

## СТРУКТУРА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАКТОРОМ В СОСТАВЕ МТА

В бортовой управляющей ЭВМ беспилотного трактора реализованы математические модели процессов МТА, в зависимости от его состояния при штатной эксплуатации, реализуются экстремальные, оптимальные и адаптивные алгоритмы управления для различных подсистем трактора.

Из непрерывно просчитываемых прогнозов-сценариев требуемых управляющих воздействий на мехатронные сервоприводы выбирается лучший по критерию надежности гарантированного достижения результата. На основе программных средств искусственного интеллекта обычно реализуются принципы ситуационного управления беспилотным трактором. Для работы система включает набор аппаратных средств и алгоритмов управления (рис. 1).

Для онлайн-контроля поведения беспилотного трактора при реализации конкретной технологической операции в процессе ее моделирования используются возможности современных симуляторов, что позволяет оценивать качество управления. Кроме того, современные программные приложения виртуального проектирования позволяют более успешно формировать общую компоновку, реализовывать множественные разноуровневые конструкторские итерации до выбора приемлемого текущего решения, как схемного, так и конструкции узлов и деталей.

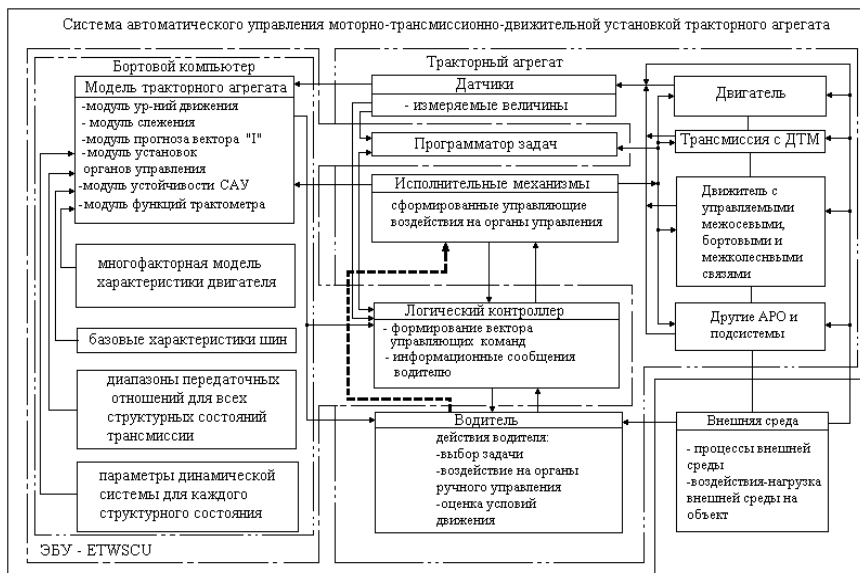


Рисунок 1 – Структура САУ тракторным агрегатом с ДТМ.

----- удаленное управление водителем-оператором,  
в том числе при отказе автоматики

## МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСМИССИИ ТРАКТОРА С ДВУХПОТОЧНОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

Разработанная крутильная динамическая система варианта МТА на базе беспилотного трактора с двухпоточным приводом колес с внешним разделением мощностей на основе планетарного механизма показана на рис. 2.

Уравнения движения инерционных масс  $I_i$  динамической модели тракторного агрегата записаны, исходя из основного уравнения динамики и принципа Даламбера, вначале без учета демпфирования в системе, чтобы не загромождать математическое описание.

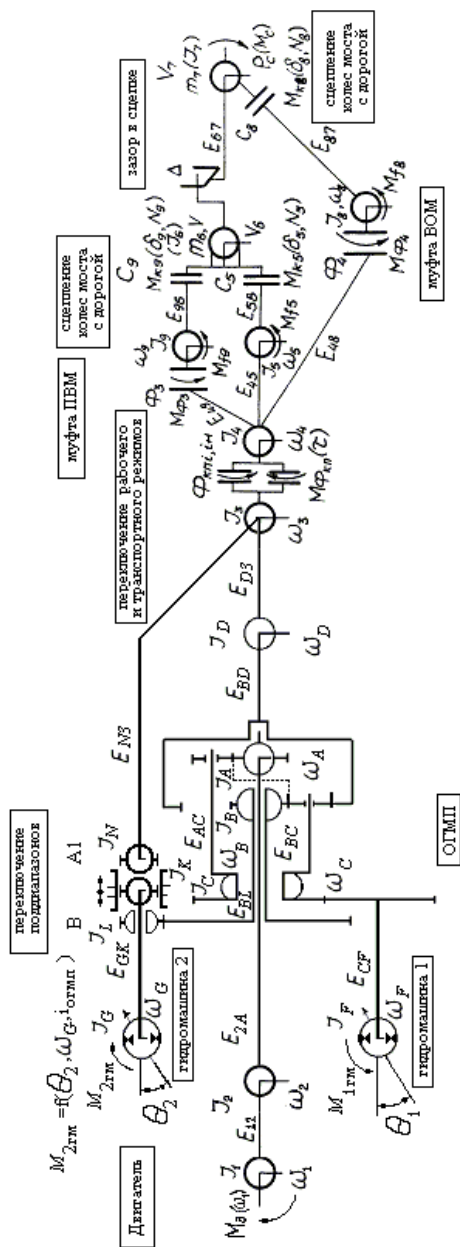


Рисунок 2 – Расчетная кривильная динамическая система тракторного транспортно-тягового агрегата с двухшaftной ОГМП в трансмиссии с четырехзвенником на первичном валу

Затем также используются выражения для учета диссипативных свойств системы. Инерционные массы связаны безинерционными упругими валами с податливостями  $E_{ij}$ . Упрощение и приведение развернутой моторно-трансмиссионно-двигательной динамической системы трактора выполнялось по известной методике Е. И. Ривина.

При буксующей муфте сцепления (на схеме не показана) и блокированной одной из муфт переключения передач редукторной части трансмиссии  $\Phi_{\text{кпн}}$  или  $\Phi_{\text{кпн}+1}$ , а также муфтах включения привода переднего ведущего моста  $\Phi_3$  и ведущего моста прицепа –  $\Phi_4$ , если необходимо рассматривать и такой, наиболее сложный вариант, то уравнения движения для этой системы, с которой будет производиться сравнение других вариантов схем, имеют вид:

$$M_{\phi 1}(t) = M_{\phi 1 \max}(t) \left(1 - e^{-k_{\phi 1} \cdot t}\right);$$

$$K_{\phi 1} = \ln 20 / t_{\text{вкл сц}}; \quad \omega_i' = d\omega_i / dt; \quad \omega_4 = \omega_3 / i_{34};$$

$$I_2 \cdot d\omega_2 / dt = M_{\phi 1}(t) - M_{23}; \quad dM_{23} / dt = (\omega_2 - \omega_3) / E_{23};$$

$$\left(I_3 + I_4 / i_{34}^2\right) \cdot \omega_3' = M_{23} - \frac{M_{45}}{i_{35}} - \frac{M_{48}}{i_{38}} - \frac{M_{49}}{i_{39}};$$

$$M_{45}' = \left(\frac{\omega_4}{i_{45}} - \omega_5\right) / E_{45}; \quad M_{fj} = f_j^0 \cdot C_j \cdot N_j \cdot r_j^0;$$

$$I_5 \cdot \omega_5' = M_{45} - M_{56} - M_{f5}; \quad M_{48}' = \left(\frac{\omega_4}{i_{48}} - \omega_8\right) / E_{48};$$

$$M_{49}' = \left(\frac{\omega_4}{i_{49}} - \omega_{89}\right) / E_{49}; \quad I_6 \cdot \omega_5' = M_{k5}(\delta_5, N_5) + M_{k9}(\delta_9, N_9) - M_{67};$$

$$I_7 \cdot \omega_7' = M_{67} + M_{k8}(\delta_8, N_8) - M_c; \quad I_8 \cdot \omega_8' = M_{48} + M_{87} - M_{f8};$$

$$I_9 \cdot \omega_9' = M_{49} + M_{96} - M_{f9}; \quad M_{56}' = \left(\omega_5 - V_{5T} / r_5^0\right) / E_{56};$$

$$M_{jk \max} = \Phi_{j \max}^0 \cdot N_j \cdot r_j^0; \quad V_{jT} = V / (1 - \delta_j);$$

$$A_j = a_j \cdot N_j \cdot r_j^0; \quad B_j = b_j \cdot N_j \cdot r_j^0;$$

$$\delta_j = \ln \left(A_j / (A_j - M_{ji})\right) / K_j, \text{ если } \delta_j \geq 0;$$

$$\delta_j = \ln \left( \frac{A_j}{(A_j - M_{ji})} \right) / K_j, \text{ если } \delta_j < 0,$$

где  $M_{ij}$  – крутящие моменты в валах, соединяющих массы  $i$  и  $j$ ;  $\omega_i$  – угловые скорости масс динамической системы;  $\delta_j, a_j, r_j, N_j, K_j$  – буксования и параметры ведущих колес трактора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель двухпоточной трансмиссии с ОГМП для анализа ее работы в составе беспилотного трактора с комплексной системой автоматического управления, как часть системы виртуального проектирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Таяновский, Г. А. Об изменении концепции и общей компоновки сельскохозяйственных тракторов / Г. А. Таяновский // Научные решения проблем развития тракторной техники, многоцелевых колесных и гусеничных машин, городского электротранспорта [Электронный ресурс]: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященный 65-летию кафедры «Тракторы», 20–21 января 2019 / редкол.: В. П. Бойков (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 172–192. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/59032>. – Дата доступа: 11.03.2023.

2. О концепции тягового электропривода сельскохозяйственного трактора / П. А. Амельченко [и др.] // Инновационные технологии в производстве сельскохозяйственной продукции: сборник науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2–3 июня 2015 г. – Минск: БГАТУ, 2015. – С. 17–19.

Представлено 10.05.2023