

**В.Б. САМОРОДОВ**, д-р. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**В.К. ДОЛЯ**, д-р. техн. наук, проф. ХНАГХ, Харьков;  
**А.О. ОСТРОВЕРХ**, ассистент, НТУ «ХПИ»;  
**С.В. ИВАЩЕНКО**, студент НТУ «ХПИ»

## **РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ДВУХПОТОЧНОЙ ГИДРООБЪЕМНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ АВТОМОБИЛЯ ДЛЯ РЕМОНТА НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН**

Предложена структурная, кинематическая схема и математическая модель бесступенчатой двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии автомобиля для ремонта нефтегазовых скважин, на базе шасси автомобиля КРАЗ-63221-02.

Запропоновано структурна, кінематична схема і математична модель безступінчастої двопотокової гідрооб'ємно-механічної трансмісії автомобіля для ремонту нафтогазових свердловин, на базі шасі автомобіля КрАЗ-63221-02.

Structural, kinematics scheme and mathematical model of two-stream continuously variable hydraulic displacement mechanical transmission for the repair of oil and gas wells on the basis of chassis KrAZ-63221-02 is proposed.

**Введение.** Согласно «Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года» (Распоряжение КМ от 15.03.2006 № 145-р), объемы добычи нефти и газа с собственных месторождений стабилизируются на уровне 5,4 млн. тонн/год, а за прогнозный период (2006 - 2030 гг) будет добыто 133,9 млн. тонн нефти с газовым конденсатом» [1]. В связи с этим практическая реализация стратегии потребует расширения и модернизации парка специализированных технических средств, как для добычи, так и для ремонта нефтегазовых скважин.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Одним из основных разработчиков мобильных установок для ремонта, добычи нефти и газа на Украине является Харьковский завод транспортного оборудования (ХЗТО). На предприятии на полноприводном (6х6) шасси автомобиля КрАЗ-63221-02 выпускается установка подъемная автомобильная УПА-80ПХ предназначенная для освоения и ремонта нефтяных и газовых скважин, для ведения буровых работ забойными двигателями или роторным способом. Установка позволяет осуществлять подъем и опускание колонны из труб весом 80 тонн. Основные операции, выполняемые на базе шасси автомобиля, это трогание с места и подъем колонны из труб, а также процесс опускания, осуществляемый под действием собственного веса [2,3].

**Цель и постановка задачи.** Разработка и анализ использования предлагаемой авторами бесступенчатой двухпоточной гидрообъемно-

механической трансмиссии (ГОМТ) на машинах типа УПА как более перспективной и эффективной.

**Механическая трансмиссия мобильной** установки УПА имеет восемь скоростных диапазонов передач в транспортном режиме движения, и технологическом режиме работы, которые обеспечиваются ступенчатой механической трансмиссией.

В результате анализа механической трансмиссии мобильной установки УПА авторами предложено заменить механическую коробку шасси автомобиля КраЗ-63221-02 на гидрообъемно-механическую коробку передач (ГОМКП), отличительной особенностью которой является то, что мощность от двигателя отбирается двумя потоками по двум ветвям: частично через гидрообъемную передачу (гидравлическую ветвь) и частично через планетарную коробку передач (механическую ветвь), в которой происходит слияние потоков мощности [10]. Схема ГОМТ показана на рис. 1 – 2. Схема программной реализации для расчета кинематических и силовых параметров трансмиссии показана на рис. 3.

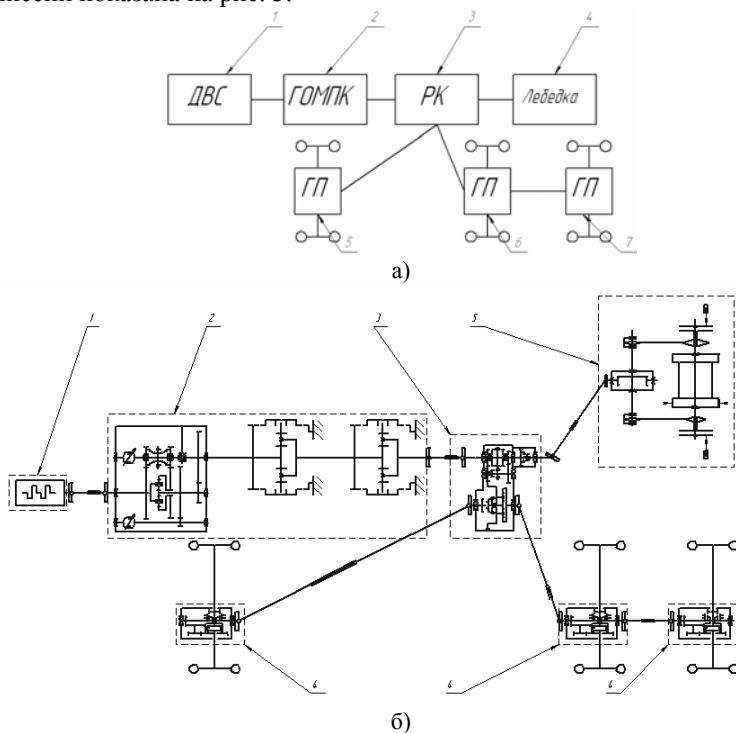


Рисунок 1 – Схема ГОМТ: а – принципиальная; б – структурная;

1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – ГОМКП; 3 – раздаточная коробка автомобиля КраЗ; 4 – лебедка; 5 – передний мост автомобиля КраЗ; 6 – средний мост автомобиля КраЗ; 7 – задний мост автомобиля КраЗ.

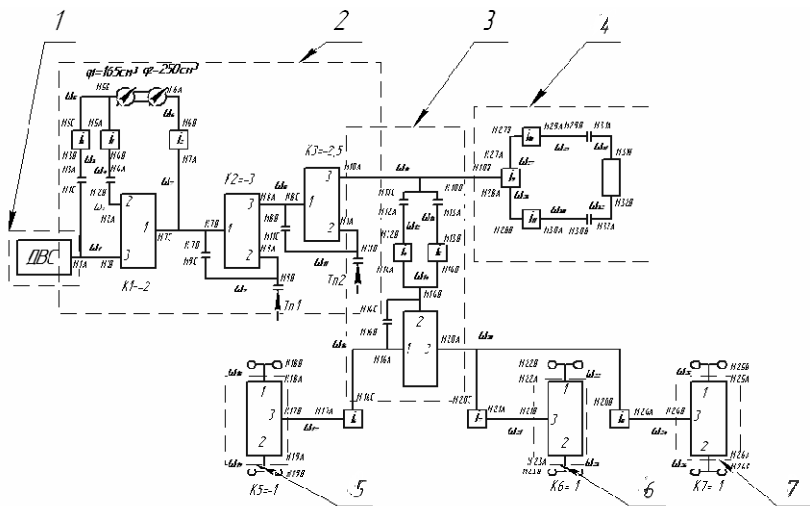


Рисунок 2 – Кинематическая схема ГОМТ:

1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – ГОМПК; 3 – раздаточная коробка автомобиля КраЗ; 4 – лебедка; 5 – передний мост автомобиля КраЗ; 6 – средний мост автомобиля КраЗ; 7 – задний мост автомобиля КраЗ.

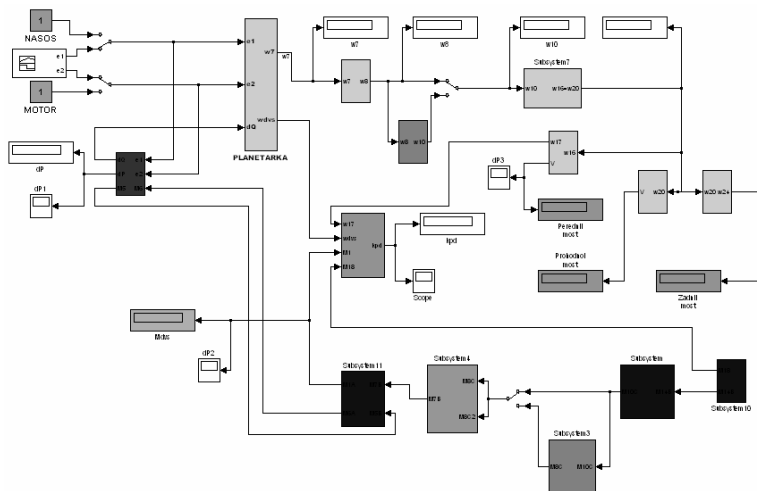


Рисунок 3 – Схема программной реализации для расчета кинематических и силовых параметров трансмиссии

Математическая модель, описывающая двухпоточную ГОМТ, представлена в следующем виде [4-9]:

Кинематические параметры ГОМТ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_7 - k_1 \omega_2 + (k_1 - 1) \omega_1 = 0; \\ S_{1_1} \omega_7 - S_{1_1} \omega_1 - \omega_{S_1} = 0; \\ S_{1_1} = \left| \frac{\omega_{\dot{\theta}0}}{\omega_7} \right| e^{i(\varphi-0)}; \\ \varphi = 0; \\ \omega_2 - \omega_4 = 0; \\ \omega_4 i_1 - \omega_5 = 0; \\ -e_1 q_1 \omega_5 - e_2 q_2 \omega_6 = (\lambda_1 + \lambda_2) \Delta P; \\ \omega_6 i_2 - \omega_7 = 0; \\ \omega_7 - k_2 \omega_9 + (k_2 - 1) \omega_8 = 0; \\ S_{1_2} \omega_7 - S_{1_2} \omega_8 - \omega_{S_2} = 0; \\ S_{1_2} = \left| \frac{\omega_{\dot{\theta}0}}{\omega_7} \right| e^{i(\varphi-0)}; \\ \omega_9 = 0; \\ \omega_8 - \omega_{11} = 0; \\ \omega_{11} - \omega_{10} = 0; \\ \omega_{10} - \omega_{12} = 0; \\ \omega_{12} i_4 - \omega_{14} = 0; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_{16} - k_4 \omega_{14} + (k_4 - 1) \omega_{20} = 0; \\ S_{1_4} \omega_{16} - S_{1_4} \omega_{20} - \omega_{S_4} = 0; \\ S_{1_4} = \left| \frac{\omega_{\dot{\theta}0}}{\omega_{16}} \right| e^{i(\varphi-0)}; \\ \omega_{16} i_6 - \omega_{17} = 0; \\ \omega_{18} - k_5 \omega_{19} + (k_5 - 1) \omega_{17} = 0; \\ S_{1_3} \omega_{18} - S_{1_3} \omega_{17} - \omega_{S_5} = 0; \\ S_{1_3} = \left| \frac{\omega_{\dot{\theta}0}}{\omega_{18}} \right| e^{i(\varphi-0)}; \\ \omega_{20} i_7 - \omega_{21} = 0; \\ \omega_{22} - k_6 \omega_{23} + (k_6 - 1) \omega_{21} = 0; \\ S_{1_6} \omega_{22} - S_{1_6} \omega_{21} - \omega_{S_6} = 0; \\ S_{1_6} = \left| \frac{\omega_{\dot{\theta}0}}{\omega_{22}} \right| e^{i(\varphi-0)}; \\ \omega_{20} i_8 - \omega_{24} = 0; \\ \omega_{25} - k_7 \omega_{26} + (k_7 - 1) \omega_{24} = 0; \\ S_{1_7} \omega_{25} - S_{1_7} \omega_{24} - \omega_{S_7} = 0; \\ S_{1_7} = \left| \frac{\omega_{\dot{\theta}0}}{\omega_{25}} \right| e^{i(\varphi-0)}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $\omega_i$  – угловая скорость звена, рад/с;

$\omega_d$  – угловая скорость коленчатого вала двигателя, рад/с;

$\omega_s$  – относительная угловая скорость сателлита, рад/с;

$k$  – внутреннее передаточное отношение планетарного ряда

$$\left( \frac{\omega_1 - \omega_3}{\omega_2 - \omega_3} = k = \pm \frac{z_{e1} \cdot z_2}{z_{e2} \cdot z_1} \right);$$

$S_1$  – характерный параметр сателлитов ( $S_1 = \frac{z_1}{z_{cm}} = \frac{2}{1-|k|}$ ,  $\frac{\omega_{cm} - \omega_3}{\omega_1 - \omega_3} = -\frac{z_1}{z_{cm}} = S_1$ );

$i_j$  – передаточное отношение редуктора;

$e_1, e_2$  – относительные параметры регулирования гидронасоса и гидромотора;

$q_1, q_2$  – максимальная производительность гидромашин, м<sup>3</sup>/рад. (гидронасоса и гидромотора соответственно)

$\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициент объемных потерь, пропорциональных перепаду давления в гидросистеме (гидронасоса и гидромотора соответственно);

$\Delta p$  – перепад рабочего давления в ГОП, МПа.

Соотношение между силовыми параметрами ГОМТ:

$$\left\{ \begin{array}{l}
M_{7C} \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{7c} \omega_7)} + M_{2A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{2a} \omega_2)} + M_{1B} = 0; \\
M_{7C} k_1 \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{7c} \omega_7)} + M_{2A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{2a} \omega_2)} = 0; \\
M_{2B} + M_{4A} = 0; \\
M_{4B} \eta_1^{\Theta \text{sign}(M_{4B} \omega_4)} + i_1 M_{5A} = 0; \\
M_{5B} - e_1 q_1 \Delta P = -\Delta M_1 \text{sign}(\omega_{50}); \\
M_{6A} + e_2 q_2 \Delta P = -\Delta M_2 \text{sign}(\omega_{60}); \\
M_{6B} \eta_2^{\Theta \text{sign}(M_{6B} \omega_6)} + i_2 M_{7A} = 0; \\
M_{7B} \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{7B} \omega_7)} + M_{9A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{9A} \omega_9)} + M_{8A} = 0; \\
M_{7B} k_2 \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{7B} \omega_7)} + M_{9A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{9A} \omega_9)} = 0; \\
M_{9A} + M_{9C} + M_{9B} T_{n1} = 0; \\
M_{8C} \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{8c} \omega_8)} + M_{11A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{11A} \omega_{11})} + M_{10A} = 0; \\
M_{8C} k_3 \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{8c} \omega_8)} + M_{11A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{11A} \omega_{11})} = 0; \\
M_{11C} + M_{8B} = 0; \\
M_{10C} + M_{12A} = 0; \\
M_{12B} \eta_4^{\Theta \text{sign}(M_{12B} \omega_{12})} + i_4 M_{14A} = 0; \\
M_{16A} \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{16A} \omega_{16})} + M_{14B} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{14B} \omega_{14})} + M_{20A} = 0; \\
M_{16A} k_4 \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{16A} \omega_{16})} + M_{14B} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{14B} \omega_{14})} = 0; \\
M_{16C} \eta_6^{\Theta \text{sign}(M_{16C} \omega_{16})} + i_6 M_{17A} = 0; \\
M_{18A} \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{18A} \omega_{18})} + M_{19A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{19A} \omega_{19})} + M_{17B} = 0; \\
M_{18A} k_5 \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{18A} \omega_{18})} + M_{19A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{19A} \omega_{19})} = 0; \\
M_{20C} \eta_7^{\Theta \text{sign}(M_{20C} \omega_{20})} + i_7 M_{21A} = 0; \\
M_{22A} \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{22A} \omega_{22})} + M_{23A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{23A} \omega_{23})} + M_{21B} = 0; \\
M_{22A} k_6 \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{22A} \omega_{22})} + M_{23A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{23A} \omega_{23})} = 0; \\
M_{20B} \eta_8^{\Theta \text{sign}(M_{20B} \omega_{20})} + i_8 M_{24A} = 0; \\
M_{25A} \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{25A} \omega_{25})} + M_{26A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{26A} \omega_{26})} + M_{24B} = 0; \\
M_{25A} k_7 \eta_{13}^{\Theta \text{sign}(M_{25A} \omega_{25})} + M_{26A} \eta_{23}^{\Theta \text{sign}(M_{26A} \omega_{26})} = 0.
\end{array} \right.
\left\{ \begin{array}{l}
M_{1A} + M_{1B} + M_{1C} = 0; \\
M_{2A} + M_{2B} = 0; \\
M_{4A} + M_{4B} = 0; \\
M_{5A} + M_{5B} + M_{5C} = 0; \\
M_{6A} + M_{6B} = 0; \\
M_{7A} + M_{7B} + M_{7C} + M_{7D} = 0; \\
M_{8A} + M_{8B} + M_{8C} = 0; \\
M_{9A} + M_{9B} + M_{9C} = 0; \\
M_{10A} + M_{10B} + M_{10C} + M_{10D} = 0; \\
M_{11A} + M_{11B} + M_{11C} = 0; \\
M_{12A} + M_{12B} = 0; \\
M_{13A} + M_{13B} = 0; \\
M_{14A} + M_{14B} + M_{14C} + M_{14D} = 0; \\
M_{16A} + M_{16B} + M_{16C} = 0; \\
M_{17A} + M_{17B} = 0; \\
M_{18A} + M_{18B} = 0; \\
M_{19A} + M_{19B} = 0; \\
M_{20A} + M_{20B} + M_{20C} = 0; \\
M_{21A} + M_{21B} = 0; \\
M_{22A} + M_{22B} = 0; \\
M_{23A} + M_{23B} = 0; \\
M_{24A} + M_{24B} = 0; \\
M_{25A} + M_{25B} = 0; \\
M_{26A} + M_{26B} = 0; \\
M_{27A} + M_{27B} = 0; \\
M_{28A} + M_{28B} = 0; \\
M_{29A} + M_{29B} = 0; \\
M_{30A} + M_{30B} = 0; \\
M_{31A} + M_{31B} = 0.
\end{array} \right. \quad (2)$$

где  $M_d$  – момент двигателя Н·м;

$M_i$  – моменты на входе и выходе редукторов, Н·м;

$\eta_i$  – КПД редуктора;

$\eta_{13}, \eta_{23}$  – КПД в зубчатых зацеплениях солнце - сателлит и эпицикл -

сателлит при остановленном водиле, определяющие потери моментов;

$\Theta$  – коэффициент учета потерь в зубчатых зацеплениях ( $\Theta = 0$  – без учета потерь,  $\Theta = -1$  с учетом потерь в зубчатых зацеплениях);

$\Delta M_1, \Delta M_2$  – моменты потерь в гидромашинах, вычисляемые как функции параметров регулирования  $e$ , угловой скорости вала гидромашин  $\omega$ , рабочего объема  $q$  и перепада давления  $\Delta p$ ;

$T_{n1}$ ,  $T_{n2}$  – параметр описывающий тормоз ( $T=1$  – тормоз включен,  $T=0$  – тормоз выключен).

Результаты расчета системы уравнений 1 и 2 реализованы в пакете визуально-ориентированного программирования MATLAB/SIMULINK и показаны на рис. 4 – 5, для транспортного режима при коэффициенте сопротивления движения:  $f=0,05$  – асфальтобетон;  $f=0,25$  – грунт;  $f=0,65$  – преодоление уклона в  $30^\circ$ , и для технологического режима работы при подъеме колонны труб весом 100т.

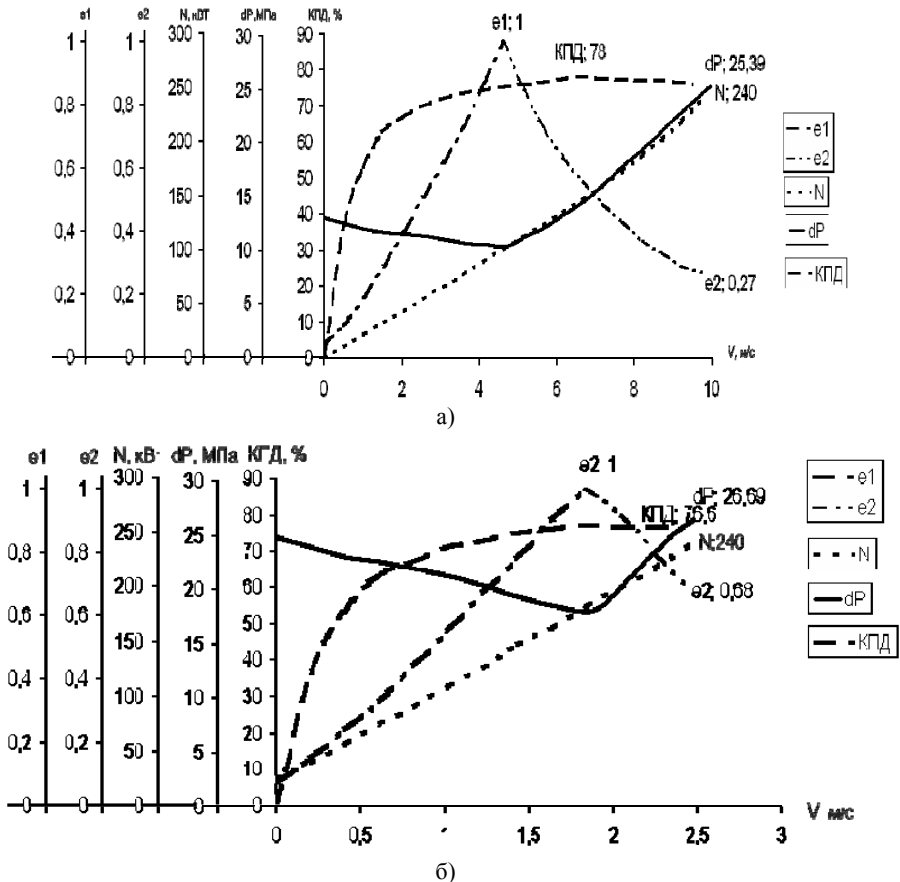


Рисунок 4 – Основные характеристики двухпоточной ГОМТ:

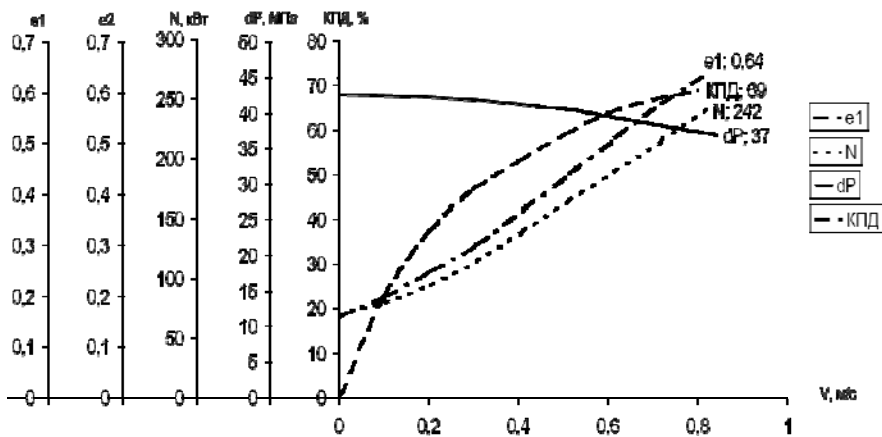
а – транспортный режим  $f=0,05$  – асфальтобетон;

б – транспортный режим  $f=0,25$  – грунт;

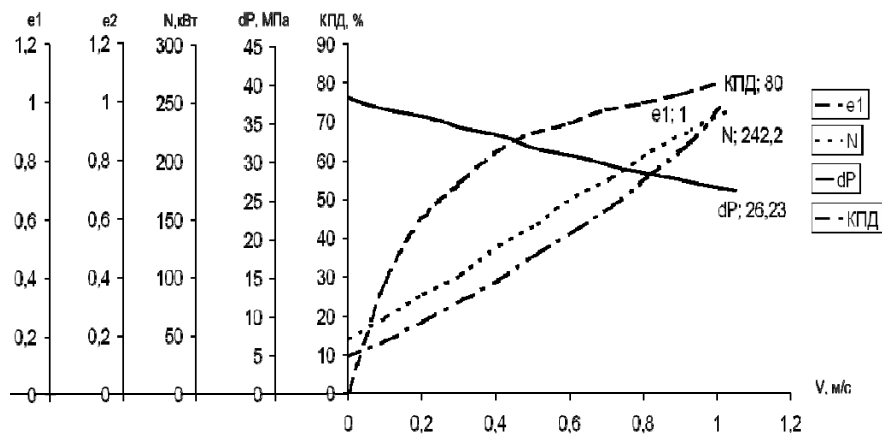
$e_1$ ,  $e_2$  – параметр регулирования угла наклона шайбы насоса и мотора;

КПД – коэффициент полезного действия трансмиссии; N - мощность ДВС;

dP – давление в гидросистеме.



а)



б)

Рисунок 5 – Основные характеристики двухпоточной ГОМТ:

а – транспортный режим  $f=0,65$  – преодоление уклона в  $30^\circ$ ;

б – технологический режим: подъем груза  $m=100\text{т}$ ;

$e_1, e_2$  – параметр регулирования угла наклона шайбы насоса и мотора;

$\text{КПД}$  – коэффициент полезного действия трансмиссии;  $N$  – мощность ДВС;

$dP$  – давление в гидросистеме.

## Выводы.

1. Предложена принципиальная структурная и кинематическая схемы бесступенчатой двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии ГОМТ автомобиля на базе шасси КраЗ-63221-02, которая обеспечивает как бесступенчатое регулирование скоростью движения автомобиля, так и

бесступенчатое управление подъемом и опусканием труб для нефтегазовых скважин с повышенной грузоподъемностью до 100т.

2. Разработана адекватная математическая модель бесступенчатой ГОМТ, которая реализована в пакете MATLAB/SIMULINK для движения автомобиля с разными сопротивлениями и в технологическом режиме подъема груза (труб) массой 100т.

3. Предложенная бесступенчатая ГОМТ рекомендуется для использования на установках подъемных автомобильных типа УПА-80, УПА-100.

**Список литературы:** 1. Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 года. КМ Украины Распоряжение КМ от 15.03.2006 № 145-р 2. <http://www.neftcom.ru/catalog?item=82>. 3. Руководство по эксплуатации 69УПА.00.00.000.РЕ. Установка подъемная УПА-80ПХ. 4. *Самородов В.Б.* Генерация матричных моделей для гидрообъемно-механических трансмиссий произвольного вида // Системотехника автомобильного транспорта. - Харьков: ХГАДГУ. - 1999. - С.61-68. 5. *Самородов В.Б.* Научное обоснование структуры силовых матричных систем, моделирующих работу гидрообъемно-механических трансмиссий // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - №47. - С.33-37. 6. *Самородов В.Б.* Основы теории автоматизированной генерации математических моделей трансмиссий // Механика и машиностроение. - Харьков: НТУ "ХПИ". - №1, 1998. - С.109-115. 7. *Самородов В.Б.* Системный подход к генерации математических матричных моделей для планетарных механических и гидрообъемно-механических трансмиссий произвольного вида // Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - №46. С.51-54. 8. *Александров Е.Е., Самородов В.Б., Волонцевич Д.О., Палащенко А.С.* Колесные и гусеничные машины высокой проходимости. В 10-ти томах. Том 3: Бесступенчатые трансмиссии: расчет и основы конструирования. - Харьков, ХГПУ.-185 с. 9. *Александров Е.Е., Лебедев А.Т., Самородов В.Б. и др.* Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин // - Харьков: ХГАДТУ, 2001.-642 с. 10. Вестник НТУ "ХПИ" "Транспортное машиностроение". - 2010. - № 39. - 79-83 с. 11. Вісті Автомобільно-дорожнього інституту, 2009, № 2(9) с 141-148

Поступила в редакцию 06.04.2012