

**Выводы.** Тормозное нажатие номинального режима для колодочно-колесного тормоза шахтных локомотивов составляет 7 кН. Вычислительный алгоритм моделирования тяги и движения шахтных поездов имеет оптимальную последовательность, так как при этом необходимо последовательным расчетом решать обе задачи теории тяги: 1) определить массу поезда для заданного плана и профиля пути; 2) для заданной массы поезда найти управляемое движение при соблюдении скорости движения или длины тормозного пути. Показатели назначения шахтного подвижного состава по эффективности тяги и торможения не равны при номинальной скорости движения поезда. Технический уровень подвижного состава по эффективности торможения ниже, чем по тяге. Проектирование серийных электровозов выполнено не верно. При увеличении сцепной массы электровозов необходимо повышать мощность тяговых двигателей (коэффициент тяги), емкость аккумуляторных батарей и мощность тормозного оборудования соответственно, чтобы не было ограничений массы поезда.

### Список литературы

1. Коптовец А.Н. Развитие научных основ разработки тормозных систем подвижного состава шахтного рельсового транспорта высокого технического уровня [Текст]: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.05.06: защищена 03.04.2013 : затв. 04.07.2013 / Коптовец Александр Николаевич; Держ. вищ. навч. закл. «Нац. гірн. ун-т». – Д., 2013. – 401 с. – Библиогр.: с. 202–213. – 0513u000475
2. Справочник по шахтному транспорту / под ред. Г.Я. Пейсаховича и И.П. Ремизова. – М.: Недра, 1977. – 624 с.
3. Транспорт шахтный локомотивный. Перевозка людей и груза в выработках с уклоном пути от 0,005 до 0,050. Общие технические требования: СОУ 10.1.00185790.004:2006. . – [Чинний від 2006-08-01]. – Д. : Стандарт Минуглепрома Украины., 2006. – 36 с. – (Стандарт Министерства угольной промышленности Украины)

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Мецержаковим Л.І.*

УДК 621.83.062.1: 622.625.28

*И.А. Таран, д-р. техн. наук*

*(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ «Национальный горный университет»)*

*С.В. Самуся, канд. техн. наук*

*(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики НАН Украины им. Н.С. Полякова)*

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ БЕССТУПЕНЧАТЫХ ТРАНСМИССИЙ ШАХТНЫХ ДИЗЕЛЕВОЗОВ НА БАЗЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

**Введение.** Для шахтных дизелевозов проблема обоснования типа бесступенчатой трансмиссии (гидрообъемно-механическая или электрическая), выбора критериев для их сравнения, рациональной структурной схемы и наиболее рациональных конструктивных параметров, множества возможных скоростных диапазонов, передаточных чисел на каждом из них с точки зрения наилучшей тяговой динамики и энергетических характеристик с учетом стохастического распределения эксплуатационных скоростей является весьма актуальной и сдерживающей дальнейшее развитие шахтного транспорта в целом.

Традиционно для каждой схемы трансмиссии (структура, качественные и количественные характеристики ее базовых элементов) в составе транспортного средства необходимо составлять математическую модель для последующего подробного анализа кинематических, силовых и энергетических параметров трансмиссии с учетом технологических процессов, выполняемых машиной. Любые конструктивные изменения в заданной кинематической схеме трансмиссии, которые особенно характерны в периоды её разработки или модернизации, требуют соответствующей перестройки структуры, математической модели и решения практически новой задачи. Это приводит к дополнительным затратам интеллектуального труда, материальных средств и времени. Построение произвольных структурных схем ступенчатой и бесступенчатой трансмиссий с параллельным автоматизированным развитием – генерацией их математических моделей [1, 2] существенно ускоряет этот процесс, позволяет синтезировать огромное их число и одновременно выявить среди них наилучший вариант.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Перераспределение потоков мощности в двухпоточных трансмиссиях преследует основную цель – получение более высокого КПД, причем именно в области максимальной производительности на тяговом и транспортном диапазонах. Для этого необходимо обеспечить такие конструктивные параметры элементов трансмиссии, при которых максимальная доля мощности передается через механическую ветвь с высоким КПД [3].

Для выбора конструктивных параметров в работах [3, 4] исследовано соотношение мощностей в параллельных ветвях бесступенчатой двухпоточной трансмиссии *Fendt-Vario* и были сделаны следующие

выводы. Во-первых, максимум общего объемного КПД  $\eta_0$  достигается при меньших рабочих давлениях нагрузки, что обеспечивается гидropередачей на базе машин с большим рабочим объемом. Во-вторых, известно, что для планетарных рядов внутреннее передаточное отношение  $k$  находится в интервале  $-4,5 \dots -1,5$  [5] и максимуму отношения  $N_1/N_2$  соответствует правая граница указанного интервала. Предложено заменить планетарный ряд простым симметричным дифференциалом с передаточным отношением  $k=-1$ , при введении которого отношение указанных мощностей максимально. Предложенная методика использована для выбора оптимальных конструктивных параметров по критерию максимума общего КПД двухпоточных гидрообъемно-механических трансмиссий (ГОМТ) рассмотренного типа с двухмашинным регулированием [3, 4].

**Цель работы** – анализ эффективности альтернативных вариантов бесступенчатых двухпоточных трансмиссий на базе электромашин и мониторинг их основных технико-экономических показателей.

**Материалы исследований.** Данная цель была достигнута путем использования созданной и впервые примененной к исследованию трансмиссий шахтных дизелевозов новой технологии анализа [1, 2] – построение произвольных структурных схем трансмиссий из меню их элементарных базовых составляющих с параллельным генерированием математических моделей.

Использование электрических передач в двухпоточных бесступенчатых трансмиссиях тягово-транспортных средств не получило широкого применения. Однако, в связи со значительным прогрессом в области создания электрических машин, разработкой новых конструкций с высокой удельной мощностью, КПД которых достигает 0,95, задача моделирования работы бесступенчатого электрического привода и получения его универсальных характеристик с целью сравнения с аналогичными для гидрообъемных передач, является актуальной. По аналогии с ГОМТ, обеспечивающей бесступенчатое регулирование, возможно создание электромеханической трансмиссии (ЭМТ) [6], позволяющей плавно изменять угловую скорость выходного звена при постоянной угловой скорости входного (коленчатого вала двигателя). Замена гидрообъемной передачи (ГОП) (рис. 1) электрической (рис. 2), в состав которой входят генератор с возбуждением постоянными магнитами, частотный преобразователь и асинхронный электродвигатель, является эквивалентной с точки зрения кинематики – без учета кинематических потерь. Это объясняется одинаковым диапазоном изменения параметра регулирования гидрообъемной и электрической передач (от 0 до 2). Замена ГОП электрической передачей теоретически не влияет на угловые скорости звеньев и скорость движения дизель-поезда, распределение потоков мощности совпадает, а КПД изменяется только из-за различного принципа работы и разных видов и величин потерь мощности в вариаторах.

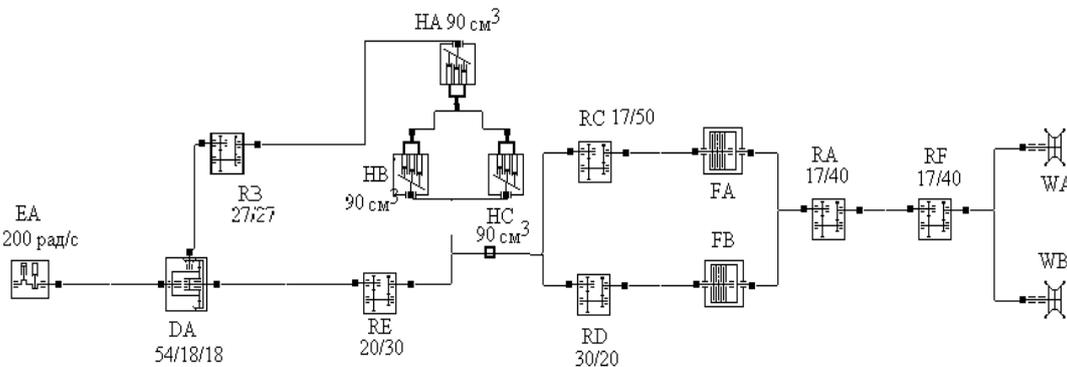


Рис. 1. Структурная схема бесступенчатой двухпоточной трансмиссии с отдельным исполнением ГОП, в основе которой лежит схемное решение Fendt-Vario

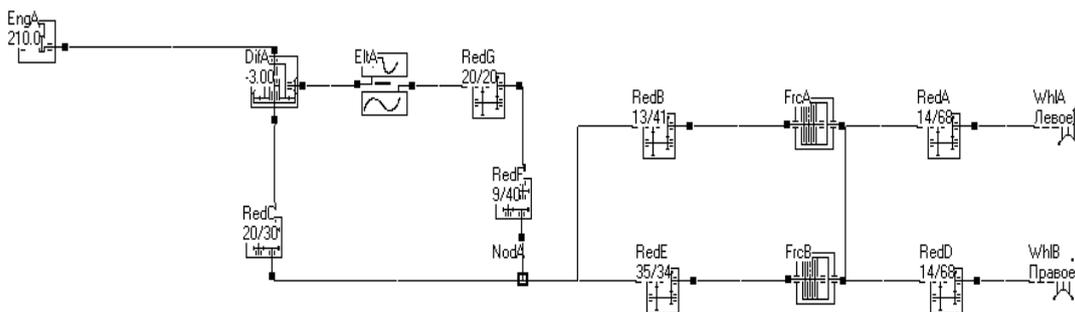


Рис. 2. Структурная схема электромеханической трансмиссии-аналога Fendt-Vario для применения в дизелевозах

На рис. 3 показано, что в момент трогания в ЭМТ согласно выражению [4] при малых значениях

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{M_1 \omega_1}{M_2 \omega_2} = -\frac{e \cdot \eta_o \cdot i_2}{k \cdot i_1} \rightarrow \max$$

параметра регулирования ( $e=0,05$ ) значительная доля мощности протекает через электрическую ветвь (в 38,9 раза больше, чем через механическую ветвь):  $N_1, N_2$  и  $M_1, M_2$  – мощности и моменты передающиеся по параллельным ветвям двухпоточной трансмиссии;  $\omega_1, \omega_2$  – угловые скорости солнечной и эпициклической шестерен планетарного ряда соответственно;  $\eta_o$  – общий объемный КПД ГОП;  $e$  – параметр регулирования;  $k, i_1, i_2$  – передаточные отношения планетарного ряда и редукторов.

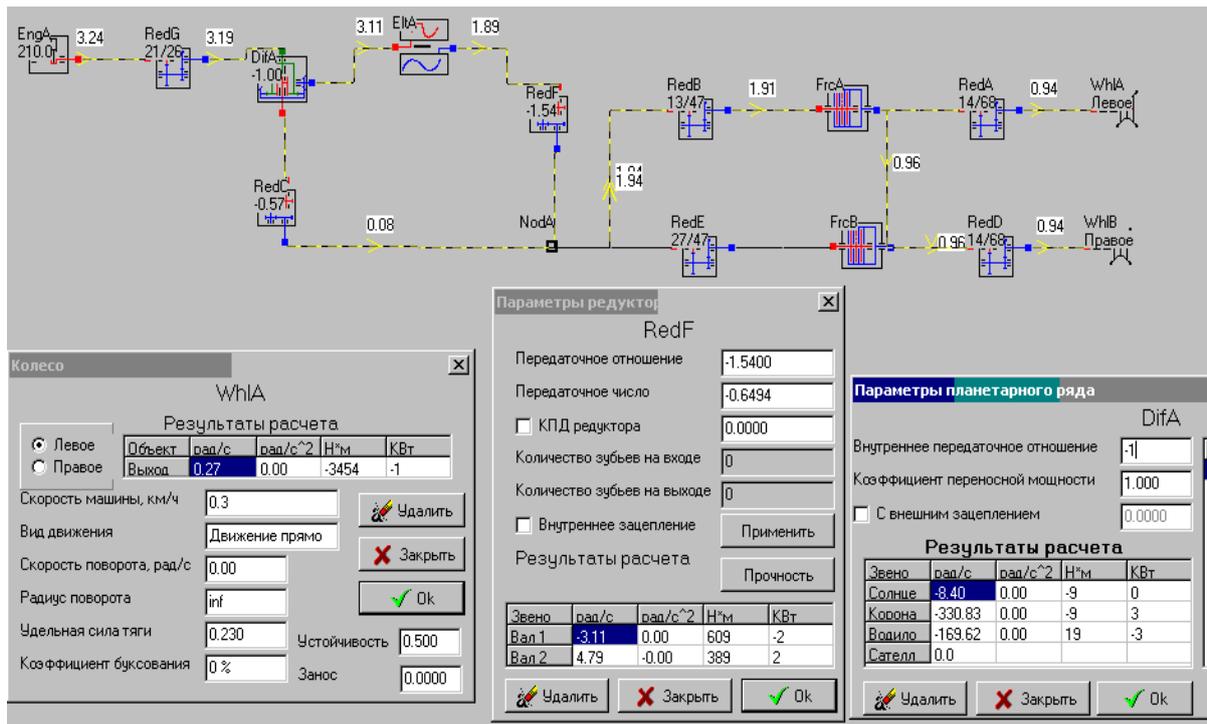


Рис. 3. Кинематические, силовые и энергетические параметры бесступенчатой электрической трансмиссии при трогании ( $e=0,01$ )

Для значения  $e = 0$  при трогании  $N_1 = 0$  и вся мощность  $N_2$ , будет протекать по электрической ветви. Следовательно, момент нагрузки, присутствующий на ведущих колесах, через редукторную цепь *RedA-RedB-RedF* приводится к валу электродвигателя. Для дизельвоза массой 10т с тяговым усилием 23кН этот момент составляет 609 Нм (рис. 3). Максимальный момент порядка 600 Нм при трогании дизельвоза достигается при напряжении 440 В, силе тока 950А, при скольжении 12% Указанный максимальный момент с помощью реостатного или других современных способов управления электроприводом перемещается в зону скольжения  $s = 100\%$ , в результате чего и обеспечивается трогание. В режиме полного скольжения ( $s = 1$ ) при трогании, электродвигатель работает с относительно низким КПД. Данное обстоятельство отражено на рис 4, где представлены результаты моделирования квазистатических режимов работы ЭМТ.

Сравнительный анализ зависимости КПД ЭМТ (рис. 4) и ГОМТ (рис. 5 [4]) от скорости движения дизель-поезда показывает, что на первом диапазоне (до 5 км/ч) ЭМТ обладает более высоким КПД. Однако именно на режимах максимальной производительности на тяговом диапазоне использование ГОП с двухмашинным регулированием дает «полку» относительно стабильного КПД трансмиссии в диапазоне 8,0-9,5 км/ч и более высокий среднеинтегральный КПД. При одномашинном регулировании, то есть с применением гидропривода ГСТ-90, среднеинтегральный КПД ГОМТ несколько ниже, чем у ЭМТ, однако сравнение этих трансмиссий только по КПД нельзя считать корректным, поскольку следует учитывать и такие важнейшие факторы, как стоимость трансмиссии и, прежде всего, бесступенчатого вариатора, его массово-габаритные показатели, амортизационные отчисления и стоимость технического обслуживания, например, в период гарантийного обслуживания, стоимость перевозки 1 т груза на 1 км пути.

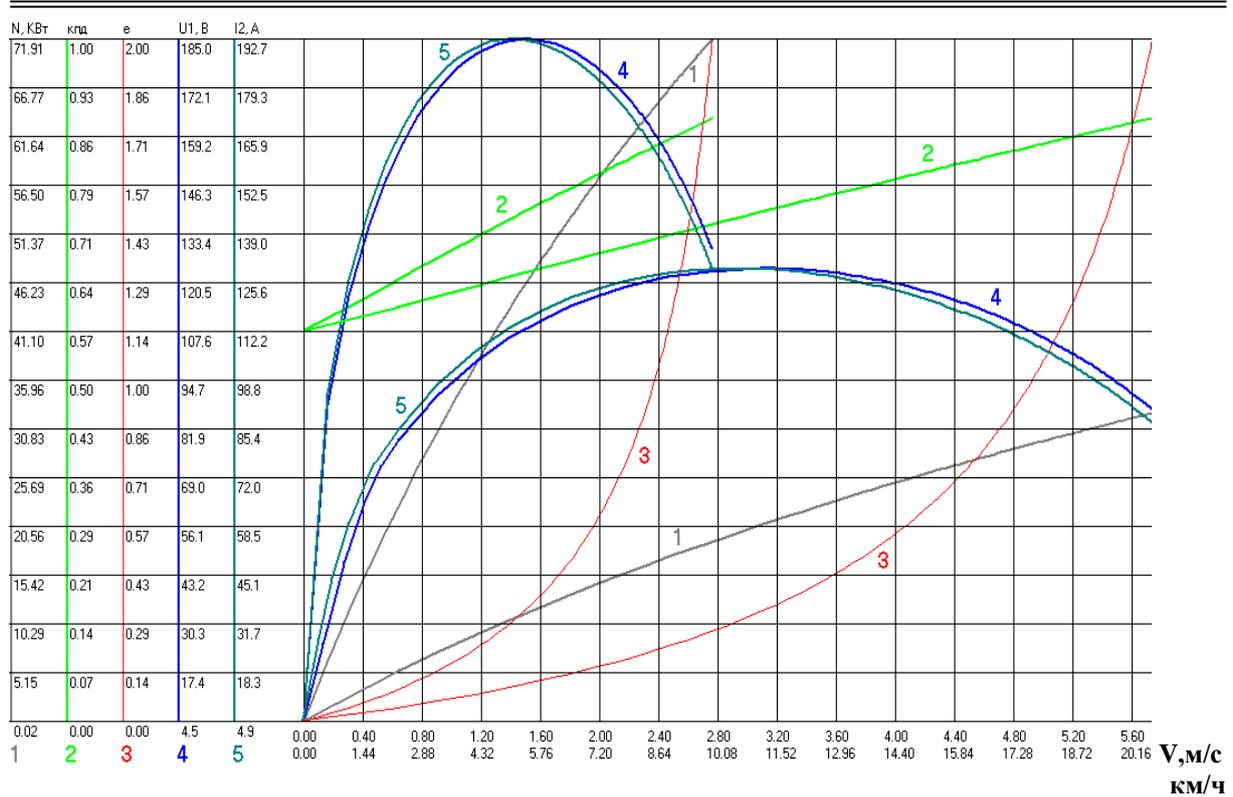


Рис. 4. Результаты квазистатического анализа работы бесступенчатой двухпоточной электромеханической трансмиссии: 1(N) – мощность двигателя, кВт; 2(кпд) – коэффициент полезного действия трансмиссии; 3(e) – параметр регулирования электрической передачи; 4(U<sub>1</sub>) – напряжение, В; 5(I<sub>2</sub>) – сила тока, А

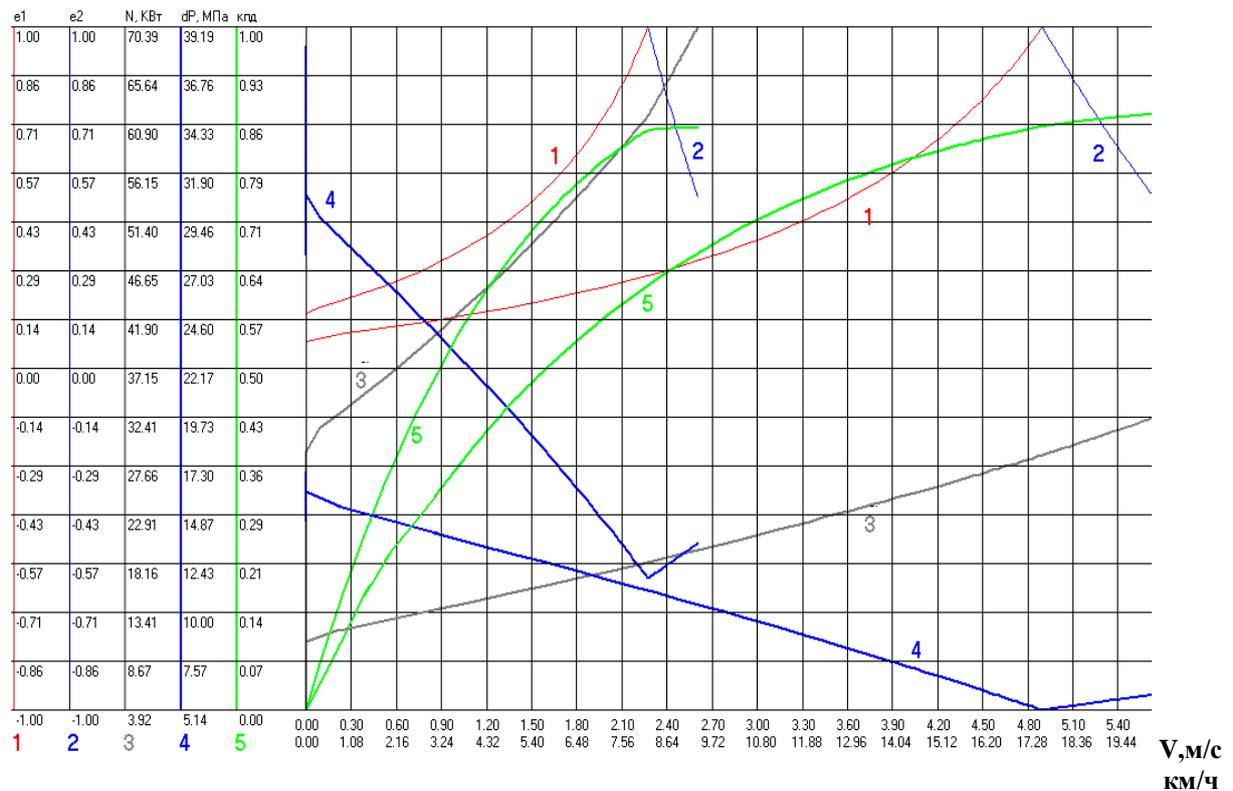


Рис. 5. Результаты анализа двухпоточной ГОМТ с параметрами, обеспечивающими максимальный КПД при двухмашинном регулировании: 1(e<sub>1</sub>) – параметр регулирования гидронасоса; 2(e<sub>2</sub>) – параметр регулирования гидромотора; 3(N) – мощность двигателя, кВт; 4(dP) – давление нагрузки, МПа; 5(кпд) – коэффициент полезного действия трансмиссии

В частности, для ЭМТ массово-габаритные и стоимостные показатели существенно хуже аналогичных показателей ГОМТ. В момент трогания КПД всей трансмиссии не превышает 0,57, что свидетельствует о больших потерях мощности в электродвигателе, поскольку вся требуемая мощность двигателя протекает через электрическую ветвь. Следовательно, при малых значениях параметра регулирования электрической передачи весь момент нагрузки, равный 609 Нм, реализуется электродвигателем. Впоследствии, с ростом параметра регулирования  $e$ , мощность и момент перераспределяются на механическую ветвь (1) и нагрузка на электродвигатель снижается. Для выхода из режима полного скольжения  $s = 1$  момент на валу электродвигателя при трогании должен быть не менее 609 Нм. Для сравнения, асинхронный электродвигатель АДП180S4 мощностью 45 кВт обладает максимальным моментом 394 Нм, при этом пусковой момент (при  $s = 1$ ) равен 380 Нм, пусковой ток – 564А. При этом в режиме максимальной мощности двигателя внутреннего сгорания (ДВС), равной 72 кВт (тяговый режим,  $e=2$ ), по электрической цепи протекает мощность 11,3 кВт, а по механической – 60,7 кВт. Таким образом, асинхронный электродвигатель, обладающий четырехкратным запасом по мощности, не реализует требуемый пусковой момент. Для реализации данного момента можно предположить необходимость применения электродвигателя мощностью 72 кВт, пусковой ток которого оценивается величиной 902А. Подобный электродвигатель – 5AM25062, обладает массой 250кг, стоит 20000 грн, и является только одним из трех элементов электрической передачи. Таким образом, минимальная стоимость электрической передачи составляет не менее 40000 грн, а масса – 400-500 кг, в то время как ГОП ГСТ-90 производства ОАО «Гидросила» (г. Кировоград) в 3 раза дешевле и в 4 раз легче, при этом максимальная пропускная мощность ГСТ-90 – 100 кВт, номинальная – 88,3 кВт. Снижение мощности электродвигателя возможно только путем уменьшения передаточного отношения  $i_2$ , но в таком случае в соответствии с (1) большая доля мощности ДВС будет пропускаться электрической передачей, что вызовет обратную тенденцию – повышение требуемой мощности электрической передачи. Даже в случае определения оптимальной величины  $i_2$ , при которой электрическая передача будет реализовывать пусковой момент и одновременно пропускать требуемую долю мощности ДВС, нельзя сказать, что использование электрических передач рационально – в силу массово-габаритных и стоимостных характеристик. Для электрических передач удельная стоимость – 416 грн/кВт, для ГОП – 55 грн/кВт. Удельная материалоемкость – 6,94 кг/кВт и 0,93 кг/кВт соответственно.

### Выводы:

1. Моделирование применения на дизелевозе бесступенчатых двухпоточных ЭМТ показывает, что в момент трогания при малых параметрах регулирования ( $e < 0,05$ ) через электропередачу кратковременно протекает значительная доля мощности. Для дизелевоза массой 10 т при приведенном коэффициенте сопротивления движению 0,23 на валу электродвигателя значение момента доходит до 609 Нм, что обеспечивается напряжением 440 В и силой тока в статоре электродвигателя 950 А. Это требует специальных современных способов управления электроприводом для обеспечения режима трогания дизель-поезда.

2. Среднеинтегральный КПД ГОМТ с применением гидропривода ГСТ-90, несколько ниже, чем у ЭМТ, однако сравнение этих трансмиссий только по КПД нельзя считать корректным, поскольку следует учитывать и такие важнейшие факторы, как стоимость трансмиссии и, прежде всего, бесступенчатого вариатора, его массово-габаритные показатели, амортизационные отчисления, стоимость технического обслуживания.

3. Массово-габаритные и стоимостные показатели ЭМТ существенно уступают аналогичным показателям ГОМТ. Показано, что для электрических передач удельная стоимость – 416 грн/кВт, для ГОП – 55 грн/кВт. Удельная материалоемкость – 6,94 кг/кВт и 0,93 кг/кВт соответственно.

Эти факты делают, по сути, бесступенчатые двухпоточные электромеханические трансмиссии неконкурентноспособными по сравнению гидрообъемно-механическими.

### Список литературы

1. Самородов В.Б. Основы матричного анализа трансмиссий транспортных машин // Информационные технологии: наука, техника, технология, оборудование, здоровье. – Харьков, 1997. –С.378-379.
2. Таран И.А. Теоретические основы автоматизированного структурного синтеза и технология матричного моделирования трансмиссий // Науковий вісник НГУ. –2009. –№11. –С. 46-53.
3. Таран И.А. Научное обоснование рациональной структуры и конструктивных параметров бесступенчатых трансмиссий шахтных дизелевозов // Науковий вісник НГУ. –2009. –№12. –С. 46-53.
4. Таран И.А. Результаты автоматизованого аналізу гідрооб'ємно-механічної трансмісії шахтного дизелевоза / И.А. Таран // Управління проектами, системний аналіз і логістика. –2010. – Вип. 7. – С. 172 – 177.
5. Планетарные передачи. Справочник / Под ред. В.Н. Кудрявцева и Ю.Н. Кирдяшева. –Л.: Машиностроение, 1977. – 536 с.
6. Декларційний патент на корисну модель № 69559 Україна, В61С 11/00, E21F 13/00. Безступінчаста трансмісія шахтного дизелевоза / С.Є. Блохін, І.О. Таран (Україна); заявник і патентовласник Нац. Гірн. Ун-т. – у 2012 02978; заявл. 14.03.2012; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Франчуком В.П.*