

телей магнитного сепаратора и рудногалечной мельницы определяет степень загрузки мельницы рудой. Если знак положительный, то мельница недогружена, а если отрицательный – перегружена. Отсутствие корреляции между сигналами является признаком оптимальной степени загрузки рудногалечной мельницы рудой.

Практическая значимость. Разработан метод и функциональная схема автоматизированного контроля степени загрузки рудногалечной мельницы рудой с учетом влияния на загрузку физико-механичес-

ких свойств железной руды, что позволяет повысить качество концентрата, уменьшить переизмельчение руды и потери железа в хвостах, повысить производительность магнитообогатительных фабрик, снизить простои оборудования.

Ключевые слова: *автоматизированный контроль, барабанные мельницы, магнитное обогащение, загрузка мельниц рудой*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В.Ткачовим. Дата надходження рукопису 07.06.13.

УДК 629.34:62-235:165.41

**И.А. Таран, д-р техн. наук, доц.,
И.Ю. Клименко**

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г.Днепропетровск, Украина, e-mail: taran_70@mail.ru

ИННОВАЦИОННЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТРАНСМИССИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**I.A. Taran, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor,
I.Yu. Klymenko**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: taran_70@mail.ru

INNOVATIVE MATHEMATICAL TOOLS FOR BENCHMARKING TRANSMISSIONS OF TRANSPORT VEHICLES

Цель. Разработать и апробировать интегральную систему критериев оценки работы бесступенчатых трансмиссий транспортных средств для объективного сравнения альтернативных вариантов. Существующая математическая формализация критериев оптимальности предложена без учета топливной экономичности. Без формализации и трансформации этого важнейшего показателя в интегральный стохастический критерий качества предложенная система критериев не является полной.

Методика. Теоретические исследования трансмиссий базируются на основных положениях теории машин и механизмов, теории замкнутых двухпоточных передач.

Результаты. В результате исследования, в режиме диалога с компьютером, на основании максимизации критериев по динамическому фактору и к.п.д. трансмиссии, минимизации критериев по тепловыделению и расходу топлива определен рациональный вектор конструктивных параметров для двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии. Применительно к трансмиссиям шахтного дизелевоза, работающего в относительно стабильном технологическом процессе, предложенная система критериев позволяет: а) определить наиболее рациональное множество конструктивных параметров трансмиссии с точки зрения максимума среднеинтегрального к.п.д.; б) применить на основе известных регулярных методов оптимизации технологию структурного и параметрического синтеза бесступенчатых трансмиссий; в) производить мониторинг альтернативных вариантов схемных решений трансмиссий еще на этапе проектирования и научно обосновано выбирать наиболее эффективную трансмиссию.

Научная новизна. За счет уточнения векторов конструктивных варьируемых параметров и предложенного нового интегрального критерия по топливной экономичности усовершенствована система критериев для оценки эффективности работы бесступенчатых трансмиссий шахтных дизелевозов, позволяющая объективно сравнивать основные технико-экономические параметры трансмиссий и определять их рациональные или оптимальные конструктивные параметры.

Практическая значимость. Заключается в использовании усовершенствованной системы критериев для обоснования типа трансмиссии, обеспечивающей необходимое тяговое усилие и бесступенчатое регулирование скорости движения дизелевоза в заданном диапазоне при работе дизельного двигателя с постоянной частотой вращения коленвала, обеспечивающей минимальные выбросы и потребление топлива.

Ключевые слова: *дизелевоз, трансмиссия, система критериев, конструктивный параметр, критерий качества*

Введение. В каждом транспортном средстве, независимо от массово-габаритных характеристик,

типа используемого движителя и функционального предназначения, для трансформации крутящего момента и угловой скорости двигателя применяется трансмиссия. Как при мониторинге и оценке рацио-

нальных векторов Γ [1] конструктивных параметров трансмиссий, так и при оценке эффективности трансмиссий в целом, необходимо учитывать наиболее вероятные режимы движения транспортного средства, близкие к математическому ожиданию эксплуатационных скоростей, а на этих скоростях – при наиболее вероятных коэффициентах сцепления, то есть реальные технологические режимы загрузки транспортного средства.

Состояние вопроса. Математическая формализация критериев оптимальности по тяговой динамике, КПД гидрообъемно-механических трансмиссий (ГОМТ) и по суммарной мощности тепловыделений в ГОМТ как функции векторного аргумента $\Gamma(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n)$ основных конструктивных параметров, впервые предложена для ступенчатой механической трансмиссии в работе [1] и для двухпоточных ГОМТ – в работе [2]. В указанных работах введены и используются три основных критерия оптимальности ГОМТ в виде формализованных критериальных объемов \bar{W}_{Dp} , \bar{W}_{np} и $\bar{W}_{\Delta Np}$, тесно связанных, соответственно, с интегральным стохастическим критерием по тяговой динамике W_{Dp} , интегральным стохастическим критерием по КПД ГОМТ W_{np} и интегральным стохастическим критерием по мощности тепловыделений ΔN в трансмиссии $W_{\Delta Np}$.

Формулировка целей работы. Разработать и апробировать интегральную систему критериев оценки работы бесступенчатых трансмиссий транспортных средств для объективного сравнения возможных альтернативных вариантов.

Материалы исследования. В работе [1] не совсем корректно утверждается, что „пределы интегрирования, удельная сила тяги тягово-транспортной машины, КПД и относительная мощность тепловыделений в ГОМТ являются функциями варьируемых переменных – всех или большей части передаточных отношений и рабочего объема гидромашин, используемых в ГОП“. Некорректность состоит в том, что на удельную силу тяги тягово-транспортной машины, на ее КПД и относительную мощность тепловыделений в трансмиссии, на расход топлива дизельного двигателя и производительность в целом влияют не только передаточные отношения и рабочий объем гидромашин, но и наиболее вероятный коэффициент сцепления в интервале скоростей $V \in [V_1; V_2]$, масса транспортного средства и номинальная эксплуатационная мощность двигателя. Более корректно и обобщенно интегральные стохастические критерии по тяговой динамике W_{Dp} , по КПД ГОМТ W_{np} и по мощности тепловыделений ΔN в трансмиссии $W_{\Delta Np}$ предлагается записывать в виде

$$\bar{W}_{Dp} = \int_{\bar{V}_1}^{\bar{V}_2} D(\Gamma, \bar{V}, f) \cdot \bar{p}(\bar{V}) d\bar{V}; \quad (1)$$

$$\bar{W}_{np} = \int_{\bar{V}_1}^{\bar{V}_2} \eta(\Gamma, \bar{V}, f) \cdot \bar{p}(\bar{V}) d\bar{V}; \quad (2)$$

$$\bar{W}_{\Delta Np} = \int_{\bar{V}_1}^{\bar{V}_2} \Delta \bar{N}(\Gamma, \bar{V}, f) \cdot \bar{p}(\bar{V}) d\bar{V}. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3), $D(\Gamma, \bar{V}, f)$, $\eta(\Gamma, \bar{V}, f)$ и $\Delta \bar{N}(\Gamma, \bar{V}, f)$ – соответственно, законы изменения удельной силы тяги тягово-транспортной машины, КПД ГОМТ и относительной мощности тепловыделений в ГОМТ как функции вектора $\Gamma(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n)$ конструктивных варьируемых параметров, относительной скорости $\bar{V} = V/V_{max}$, где \bar{V}_1, \bar{V}_2 – минимальная и максимальная относительные скорости, соответствующие заданному интервалу реальных эксплуатационных скоростей V_1 и V_2 ; f – коэффициент сопротивления движению, а $\bar{p}(\bar{V})$ – относительная плотность распределения относительных эксплуатационных скоростей движения

$$\bar{p}(\bar{V}) = \exp\left\{-0,5\left[\frac{(\bar{V} - M(\bar{V}))}{\sigma(\bar{V})}\right]^2\right\}, \quad (4)$$

где $M(\bar{V})$ и $\sigma(\bar{V})$ – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение случайной величины \bar{V} .

В приведенных выражениях интегральных стохастических критериев качества для бесступенчатых гидрообъемно-механических трансмиссий и для бесступенчатых электромеханических трансмиссий (ЭМТ) предлагается использовать, соответственно, собственные векторы конструктивных параметров $\Gamma(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n, q, m, N_d)$ и $\Gamma'(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n, k_u, k_i, m, N_d)$ вместо предложенного ранее в работе [1] вектора $\Gamma(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n)$.

На рис. 1 приведена пространственная иллюстрация стохастических критериев по тяговой динамике W_{Dp} , по КПД W_{np} и по мощности тепловыделений $W_{\Delta Np}$ определенная для двухдиапазонной бесступенчатой ГОМТ. Построение поверхностей удельной силы тяги, КПД ГОМТ и мощности тепловыделений удобно проводить в единичном кубе с осями в виде относительной скорости \bar{V} , относительной плотности распределения вероятности $\bar{p}(\bar{V})$ эксплуатационных скоростей и динамического фактора D , который также ограничен единицей. Величина ΔN также нормирована своим максимальным значением ΔN_{max} , и по оси $\Delta \bar{N}$ также откладываются относительные значения мощности тепловыделений, не превосходящие единицу. Геометрический смысл формализованных объемов \bar{W}_{Dp} , \bar{W}_{np} и $\bar{W}_{\Delta Np}$ совпадает с геометрическим смыслом интегралов в выражениях (1)–(3). Это – объемы прямых неправильных призм $\bar{V}_1 \bar{V}_2 \text{CEGFC}'E'$ под выделенными поверхностями, ограниченные в основании единичного куба плоскостью между кривой относительной плотности распределения $\bar{p}(\bar{V})$ и осью OV , двумя плоскостями

ЕЕ'G \bar{V}_1 и СС'F \bar{V}_2 , перпендикулярными основанию и оси OV, пересекающимися ее в точках \bar{V}_1 и \bar{V}_2 , поверхностью ее вертикальных образующих и частью GF $\bar{V}_2\bar{V}_1$ наиболее удаленной грани куба (рис. 1, б). Рассмотренные прямые неправильные призмы под выделенными поверхностями входят в параллелепипеды AB $\bar{V}_2\bar{V}_1$ A'B' $\bar{V}_2'\bar{V}_1'$ с единичными высотами, объемы W_{12} которых численно равны разности $\bar{V}_2 - \bar{V}_1$.

В целом в работе [1] введены и используются только три критерия оптимальности ГОМТ в виде формализованных критериальных объемов \bar{W}_{Dp} , \bar{W}_{np} и $\bar{W}_{\Delta np}$. К сожалению, авторы этих работ не упоминают о таком важном технико-экономическом показателе как топливная экономичность. Без формализации и трансформации этого важнейшего показателя в интегральный стохастический критерий качества предложенная в работе [1] система критериев не является полной. Кроме того, обобщая предложенный подход по созданию критериев качества на случай как бесступенчатых гидрообъемно-механических, так и бесступенчатых электромеханических трансмиссий следует, как уже было сказано выше, учитывать только векторы конструктивных варьируемых параметров в виде $\Gamma(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n, q, m, N_d)$ и $\Gamma'(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n, k_u, k_i, m, N_d)$.

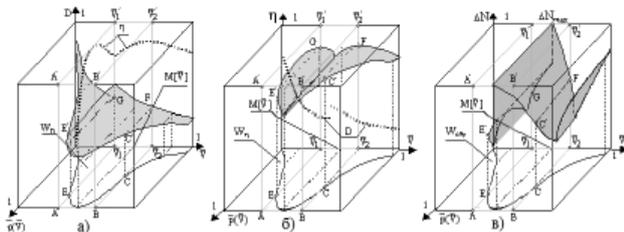


Рис. 1. Иллюстрация интегральных стохастических критериев для бесступенчатых трансмиссий транспортных средств: а) – по тяговой динамике W_{Dp} ; б) – по КПД ГОМТ W_{np} ; в) – по мощности тепловыделений $W_{\Delta np}$ в трансмиссии

Интегральный стохастический критерий W_{Qp} по топливной экономичности предлагается записывать в виде

$$\bar{W}_{Qp} = \int_{\bar{V}_1}^{\bar{V}_2} Q(\Gamma, \bar{V}, f) \cdot \bar{p}(\bar{V}) d\bar{V}, \quad (5)$$

где $Q(\Gamma, \bar{V}, f)$ – мгновенный часовой расход двигателя внутреннего сгорания транспортного средства как функция вектора Γ конструктивных варьируемых параметров бесступенчатой трансмиссии, относительной скорости $\bar{V} = V/V_{max}$ (\bar{V}_1, \bar{V}_2 – минимальная и максимальная относительные скорости заданного интервала реальных эксплуатационных скоростей V_1

и V_2) и коэффициента сцепления f ; $\bar{p}(\bar{V})$ – относительная плотность распределения относительных эксплуатационных скоростей движения.

Геометрически интегральный стохастический критерий W_{Qp} по топливной экономичности представляет объем фигуры, выделенной в координатах $\bar{p}(\bar{V}), \bar{V}$ и Q . На рис. 2 приведена предлагаемая автором пространственная иллюстрация четвертого интегрального стохастического критерия по топливной экономичности W_{Qp} .

Определение рационального вектора конструктивных параметров в режиме диалога с ПЭВМ (или на основе адаптации и развития параметрического синтеза применительно к бесступенчатым ГОМТ и ЭМТ) строится на удовлетворении стохастических интегральных критериев, которые формализованы группами соотношений (1)–(3) и (5) – причем первые пары указанных соотношений – стохастические интегральные критерии по тяговой динамике и коэффициенту полезного действия – должны в процессе расчетно-теоретического обоснования бесступенчатых трансмиссий максимизироваться, а вторые пары этих соотношений – интегральные стохастические критерии по мощности тепловыделений в трансмиссии и введенный интегральный стохастический критерий по топливной экономичности, должны минимизироваться с учетом ограничений конструктивного и эксплуатационного порядка.

Следует особо отметить, что только первый и четвертый критерии являются антагонистическими.

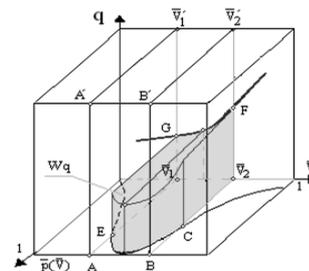


Рис. 2. Пространственная иллюстрация интегрального стохастического критерия по топливной экономичности W_{Qp}

Таким образом, поиск рационального вектора конструктивных параметров является в целом достаточно сложной и громоздкой задачей параметрического синтеза – многокритериальной оптимизационной задачей, в которой в будущем должны появиться системы экспертных оценок, логика определения весовых коэффициентов в аддитивном обобщенном функционале качества или их назначение лицом, принимающим решение.

В качестве примера определим рациональный вектор конструктивных параметров для ГОМТ № 2 [2] (рис. 3) в режиме диалога с ПЭВМ на основании максимизации первых двух критериев по динамическому фактору и к.п.д. трансмиссии, и минимизации критерия

риев по тепловыделениям и расходу топлива (1)–(2), (3)–(5). Результаты этих исследований приведены на рис. 4. На рис. 4 представлены зависимости полного к.п.д. (кривые 1), динамического фактора (кривые 2), мощности тепловыделений в трансмиссии (кривые 3), почасового расхода топлива (кривые 4) в зависимости от скорости при работе ГОМТ № 2 в составе дизельево-за массой 10 т. на первом тяговом и втором транспортном диапазонах. При расчетах принято (первый столбец данных на рис. 5): математическое ожидание эксплуатационной скорости дизель-поезда – $M[V] = 18$ км/ч (5 м/с); скоростью интервал построения интегральных стохастических критериев качества $V_1 = 16$ км/ч (4,44 м/с); $V_2 = 20$ км/ч (5,56 м/с); среднеквадратическое отклонение $\sigma[V] = 2$ км/ч (0,56 м/с).

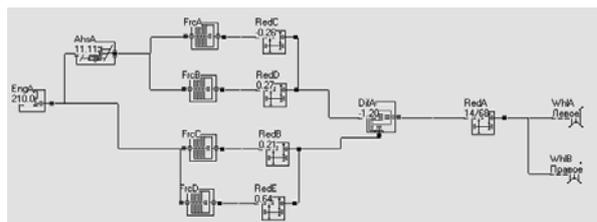


Рис. 3. Структурная схема бесступенчатой двухпоточной трансмиссии ГОМТ № 2 и её конструктивные параметры: EngA – двигатель; AhsA – ГОП; RedA, RedB, RedC, RedD и RedE – редукторы; DifA – суммирующий планетарный ряд; WhlA и WhlB – ведущие оси; FrcA, FrcB, FrcC, FrcD – фрикционы

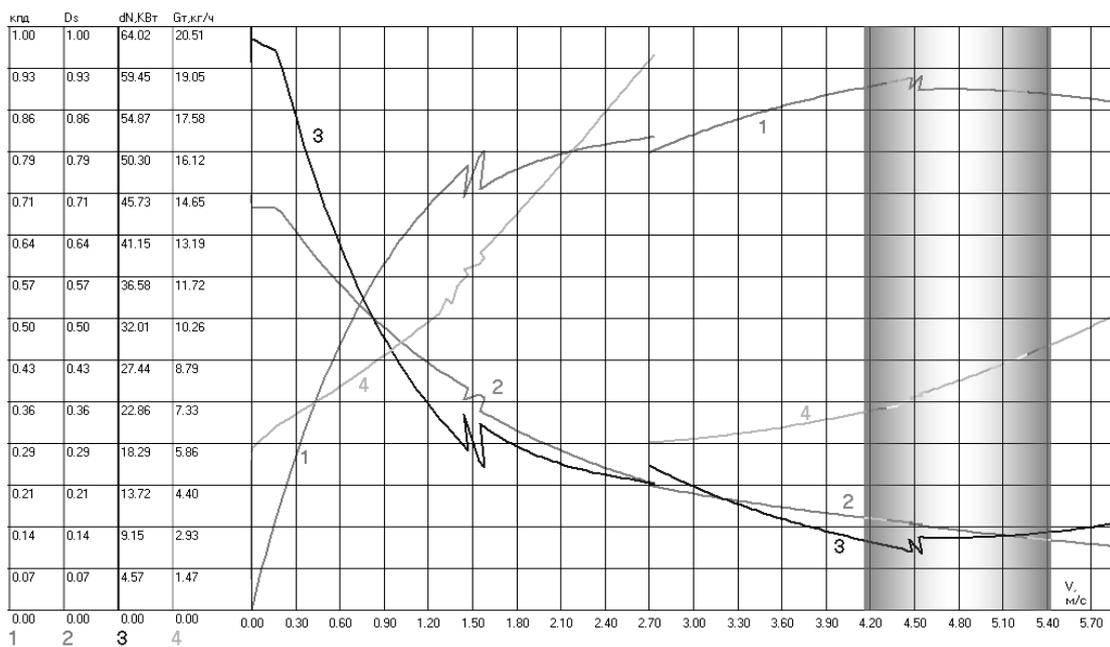


Рис. 4. Среднеинтегральные критерии для бесступенчатой ГОМТ №2: полный к.п.д. (1); динамический фактор (2); мощность тепловыделений (3); почасовой расхода топлива (4) для ГОП с $q=89$ см³

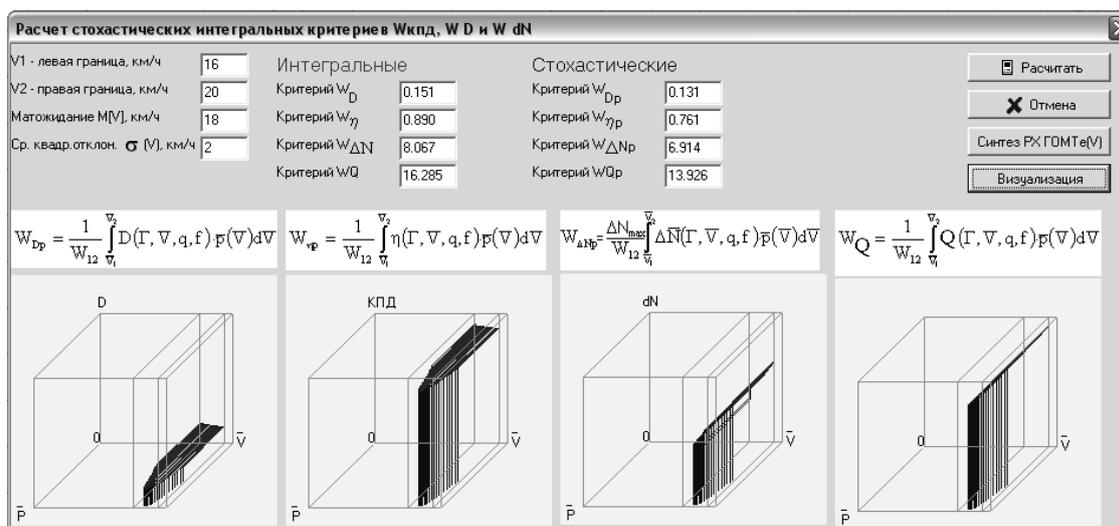


Рис. 5. Визуализация интегральных стохастических критериев для бесступенчатой ГОМТ № 2

На рис. 5 представлені значення середньінтегральних критеріїв W_D , W_T , $W_{\Delta N}$, W_Q (второй столбец данных). На том же рисунку в третьем столбце данных приведены значения стохастических интегральных критериев, вычисленных по группе формул (1)–(3), (5) и их трехмерная визуализация.

Выводы и перспективы использования.

1. Для бесступенчатых гидрообъемно-механических трансмиссий модернизированы и обобщены интегральные стохастические критерии по тяговой динамике W_{Dp} , по к.п.д. W_{np} , по мощности тепловыделений ΔN в трансмиссии $W_{\Delta Np}$. Уточнены векторы конструктивных варьируемых параметров $\Gamma(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n, q, m, N_d)$ и $\Gamma(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n, k_w, k_b, m, N_d)$, соответственно, для ГОМТ и ЭМТ.

2. Введен новый интегральный стохастический критерий по топливной экономичности и предложена обобщенная интегрированная система критериев, позволяющая не только объективно сравнивать их основные технико-экономические параметры, но и определять по введенным выше критериям наиболее рациональные или оптимальные конструктивные параметры.

3. Для решения в будущем научной проблемы структурного и параметрического синтеза для перспективных бесступенчатых трансмиссий в составе тягового транспорта, система предложенных интегральных стохастических критериев качества, позволяющая провести объективное сравнение альтернативных вариантов трансмиссий, будет иметь решающее значение.

Список литературы / References

1. Самородов В.Б. Алгоритм оптимизации передаточных отношений механической ступенчатой трансмиссии по критерию наилучшей тяговой динамики гусеничной машины / В.Б. Самородов // Вісник ХДПУ. – 1999. – Вип 36. – С. 135–140.

Samorodov, V.B. (1999), "Response relationship optimization algorithm of mechanical transmission by the best traction dynamics of a caterpillar", *Visnyk HDPU*, no 36, pp. 135–140.

2. Таран И.А. Закономерности передачи мощности по вервям двухпоточных гидрообъемно-механических трансмиссий / И.А. Таран // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 2. – С.69–75.

Taran, I.A. (2012), "Laws of power transmission on branches of double-split hydrostatic mechanical transmission", *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no 2, pp. 69–75.

Мета. Розробити та апробувати інтегральну систему критеріїв оцінки роботи безступінчастих трансмісій транспортних засобів для об'єктивного порівняння альтернативних варіантів. Існуюча математична формалізація критеріїв оптимальності запропонована без урахування паливної економічності. Без формалізації та трансформації цього важливого показника в інтегральний стохастичний критерій

якості запропонована система критеріїв не є повною.

Методика. Теоретичні дослідження трансмісій базуються на основних положеннях теорії машин і механізмів, теорії замкнутих двопотокових передач.

Результати. У результаті дослідження, у режимі діалогу з комп'ютером, на основі максимізації критеріїв динамічного фактору к.к.д. трансмісії, і мінімізації критеріїв тепловиділення та витрати палива визначений раціональний вектор конструктивних параметрів для двопотокової гідрооб'ємно-механічної трансмісії. Стосовно трансмісій шахтного дизелевоза, що працює у відносно стабільному технологічному процесі, запропонована система критеріїв дозволяє: а) визначити найбільш раціональну множину конструктивних параметрів трансмісії з точки зору максимуму середньінтегрального к.к.д. ; б) застосовувати на основі відомих регулярних методів оптимізації технологію структурного та параметричного синтезу безступінчастих трансмісій ; в) здійснювати моніторинг альтернативних варіантів схемних рішень трансмісій ще на етапі проектування та науково обгрунтовано обирати найбільш ефективну трансмісію.

Наукова новизна. За рахунок уточнення векторів конструктивних варіюваних параметрів і запропонованого нового інтегрального критерію з паливної економічності вдосконалена система критеріїв для оцінки ефективності роботи безступінчастих трансмісій шахтних дизелевозів, що дозволяє об'єктивно порівнювати основні техніко-економічні параметри трансмісій і визначити їх раціональні або оптимальні конструктивні параметри.

Практична значимість. Полягає у використанні вдосконаленої системи критеріїв для обгрунтування типу трансмісії, що забезпечує необхідне тягове зусилля та безступінчасте регулювання швидкості руху дизелевоза в заданому діапазоні при роботі дизельного двигуна з постійною частотою обертання коленавала, що забезпечує мінімальні викиди й споживання палива.

Ключові слова: дизелевоз, трансмісія, система критеріїв, конструктивний параметр, критерій якості

Purpose. Development and evaluation of integral criteria system for stepless transmissions of vehicles for objective comparison of the alternatives. Available mathematical formalization of optimum criteria has been proposed without taking into consideration fuel efficiency. The system cannot be complete without formalization and transformation of the key factor into integral stochastic criterion.

Methodology. Theoretical studies of transmissions were based on the key issues of theory of machines and mechanisms and on the theory of closed double-split transmissions.

Findings. Rational vector of design parameters for two-stream hydrostatic mechanical transmission has been determined in a computer-interaction mode basing on

maximization of criteria according to dynamic factor and transmission efficiency and minimization of criteria according to heat emission and fuel consumption. As for transmission of a mine diesel locomotive operating in relatively stable technological process, the system of criteria allows: a) determining optimum set of transmission design parameters from the viewpoint of mean integral efficiency; b) applying a technique of structural and parametrical synthesis of stepless transmissions using known regular optimization methods; c) monitoring alternatives of transmission circuitry at a design stage applying scientific substantiation to select the most efficient transmission.

Originality. Criteria system to evaluate efficiency of stepless transmission of mine diesel locomotives has been improved owing to correction of vectors of structurally variable parameters; and new integral criterion

according to fuel efficiency has been proposed. This makes it possible to compare objectively basic technical and economic parameters of transmissions and specify their rational or optimal design parameters.

Practical value. The improved criteria system can be used for substantiation of transmission type providing required moving force and stepless regulation of diesel locomotive speed within the given range when diesel engine operates with constant crankshaft rotation frequency providing minimum emissions and fuel consumption.

Keywords: *diesel locomotive, transmission, criteria system, design parameter, quality criterion*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
В.І. Самусею. Дата надходження рукопису 25.07.13.*