

**И.А.Таран**  
**ДВНЗ "Національний гірничий університет"**  
**МОНИТОРИНГ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ТРАНСМИССИЙ**  
**ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ**  
**СТОХАСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ**

*Применительно к трансмиссиям транспортных средств работающих 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.*

**Ключевые слова:** транспортное средство, трансмиссия, синтез, система критериев, конструктивный параметр, критерий качества.

*Рис 4. Форм 5. Лит 7.*

*Стосовно трансмісії транспортного засобу, що працює у відносно стабільному технологічному процесі, запропонована система критеріїв дозволяє: а) визначити найбільш раціональну множину конструктивних параметрів трансмісії з точки зору максимуму середньоінтегрального к.к.д.; б) застосовувати на основі відомих регулярних методів оптимізації технологію структурного і параметричного синтезу безступінчастих трансмісій; в) здійснювати моніторинг альтернативних варіантів схемних рішень трансмісій ще на етапі проектування і науково обґрунтовано обирати найбільш ефективну трансмісію.*

**Ключові слова:** транспортний засіб, трансмісія, синтез, система критеріїв, конструктивний параметр, критерій якості.

*Development and evaluation of integral criteria system for transmissions of vehicles for objective comparison of the alternatives. Available mathematical formalization of optimum criteria is proposed without taking into consideration fuel efficiency. The system cannot be complete without formalization and transformation of the key factor into integral stochastic criterion. Theoretical studies of transmissions are based on the key issues of theory of machines and mechanisms and on the theory of closed double-split transmissions.*

*Rational vector of design parameters for mechanical transmission is 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. Criteria system to evaluate efficiency of transmission of transport vehicle has been improved owing to correction of vectors of structurally variable parameters and proposed new integral criterion according to fuel efficiency. That makes it possible to compare objectively basic technical and economic parameters of transmissions specifying their rational or optimal design parameters.*

*Practical value is to use improved criteria system for substantiation of transmission type providing required moving force and stepless regulation of transport vehicle speed within the given range when diesel engine operates with constant crankshaft rotation frequency providing minimum emissions and fuel consumption.*

**Keywords:** transport vehicle, transmission, synthesis, criteria system, design parameter, quality criterion.

**Введение.** В каждом транспортном средстве, независимо от массово-габаритных характеристик, типа используемого двигателя и функционального предназначения, для трансформации крутящего момента и угловой скорости двигателя применяется трансмиссия. При мониторинге и оценке рациональных векторов  $\Gamma$  [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.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Математическая формализация критериев оптимальности – по тяговой динамике, к.п.д. трансмиссий и по суммарной мощности тепловыделений – 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 работах [2, 3] и для двухпоточных гидрообъемно-механических трансмиссий (ГОМТ) – в работе [4]. В указанных работах введены и используются три основных критерия оптимальности 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  $W_{np}$  и интегральным стохастическим критерием по мощности тепловыделений  $\Delta N$  в трансмиссии  $W_{\Delta Np}$ .

**Цель исследования, постановка задач.** Разработать и апробировать интегральную систему критериев оценки работы 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.

**Материалы исследования.** В работе [4] не совсем корректно утверждается, что «пределы интегрирования, удельная сила тяги тягово-транспортной машины, к.п.д. 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 его к.п.д. и относительную мощность тепловыделений в его трансмиссии, на расход топлива дизельного двигателя и производительность в целом влияют не только передаточные отношения и рабочий объем гидромашин, а 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 к.п.д. ГОМТ  $W_{np}$  и по мощности тепловыделений  $\Delta N$  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 трансмиссии и относительной мощности тепловыделений в ней как функции вектора  $\Gamma(i_1, i_2, \dots, i_m, k_1, k_2, \dots, k_n)$  конструктивных варьируемых параметров, относительной скорости  $\bar{V} = V/V_{max}$ ;  $\bar{V}_1, \bar{V}_2$  – минимальная и максимальная относительные скорости, соответствующие заданному интервалу реальных эксплуатационных скоростей  $V_1$  и  $V_2$ ;  $f$  – коэффициент сопротивления движению;  $\bar{p}(\bar{V})$  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  $\bar{V}$ .

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 трансмиссии. Построение поверхностей удельной силы тяги, КПД 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  $\Delta N$  также нормирована своим максимальным значением  $\Delta N_{max}$  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 выражении

ях (1) – (3). Это – объемы прямых неправильных призм  $\bar{V}_1\bar{V}_2CEGFC'E'$  под выделенными поверхностями, ограниченные в основании единичного куба плоскостью между кривой относительной плотности распределения  $\bar{p}(\bar{V})$  и осью  $OV$ , двумя плоскостями  $EE'G\bar{V}_1$  и  $CC'F\bar{V}_2$ , перпендикулярными основанию и оси  $OV$ , пересекающими 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  $AB\bar{V}_2\bar{V}_1A'B'\bar{V}'_2\bar{V}'_1$  с единичными высотами, объемы  $W_{12}$  которых численно равны разности  $\bar{V}_2 - \bar{V}_1$ .

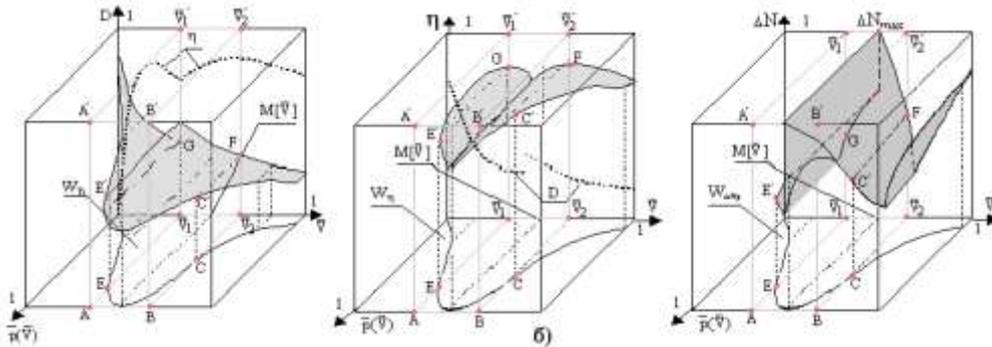


Рис. 1. Иллюстрация интегральных стохастических критериев  $W_{Dp}$ ,  $W_{np}$  и  $W_{Dnp}$ . Для бесступенчатых трансмиссий транспортных средств

В целом в работах [1-4] введены и используются только три критерия оптимальности в виде формализованных критериальных объемов  $\bar{W}_{Dp}$ ,  $\bar{W}_{np}$  и  $\bar{W}_{Dnp}$ . К сожалению, авторы этих работ ничего 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 работах [1-4] система критериев не является полной. 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 ДВС транспортного средства, как функция вектора  $\Gamma$  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 авторами пространственная иллюстрация четвертого, интегрального стохастического критерия по топливной экономичности  $W_{Qp}$ . Определение рационального вектора конструктивных параметров в режиме диалога с компьютером 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.

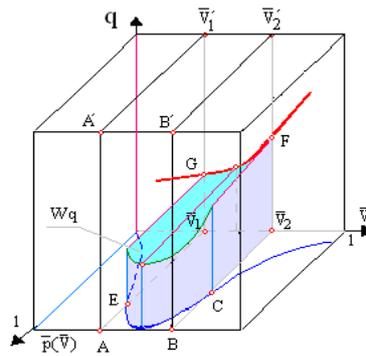


Рис. 2. Пространственная иллюстрация интегрального стохастического критерия по топливной экономичности  $W_{Op}$

Следует особо отметить, что только первый и четвертый критерии являются антагонистическими. 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 ступенчатой механической трансмиссии [5] (рис.3) в режиме диалога с ПЭВМ на основании максимизации первых двух критериев по динамическому фактору и к.п.д. трансмиссии, и минимизации критериев по тепловыделениям и расходу топлива (1) – (2), (3) – (5).

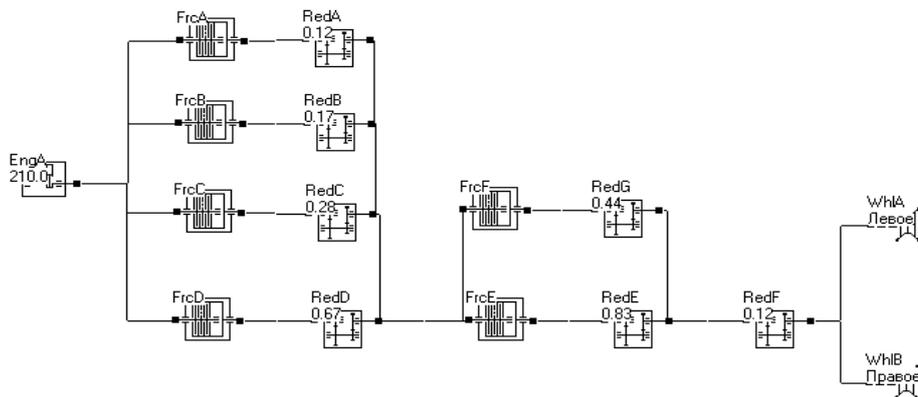


Рис. 3. Структурная схема ступенчатой механической трансмиссии: EngA – двигатель; FrcA, FrcB, FrcC, FrcD, FrcE и FrcF – фрикционы; RedA, RedB, RedC, RedD, RedG, RedE и RedF – редукторы; WhlA и WhlB – ведущие оси.

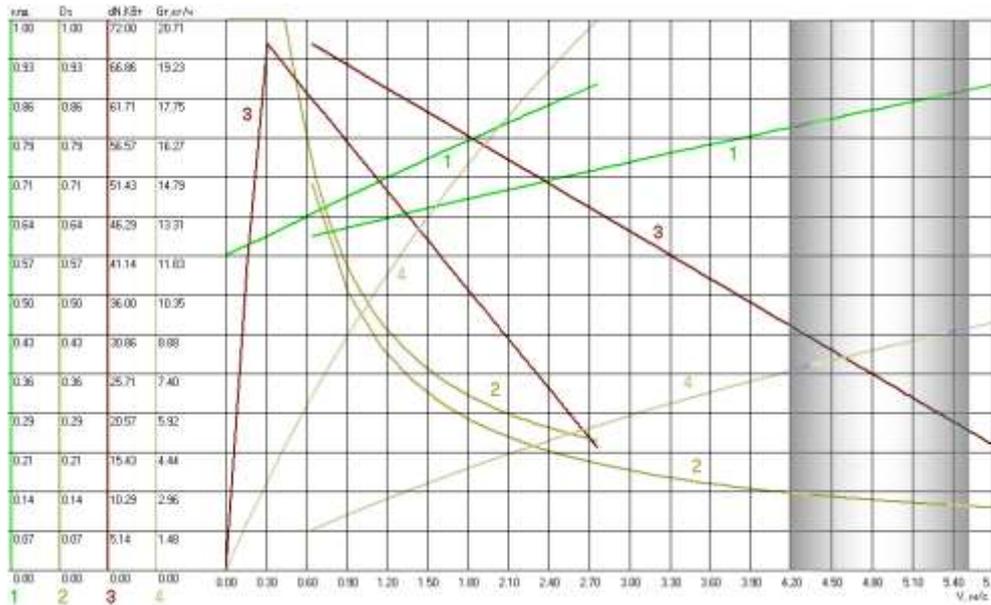
Результаты этих исследований приведены на рис. 4.

На рис. 4, а представлены зависимости полного к.п.д. (кривые 1), динамического фактора (кривые 2), мощности тепловыделений в трансмиссии (кривые 3), почасового расхода топлива (кривые 4) от скорости при работе ГОМТ №1 в составе дизельпоезда массой 10 т на первом тяговом и втором транспортном диапазонах. При расчетах принято (первый столбец данных на рис. 4, б): математическое ожидание эксплуатационной скорости дизельпоезда –  $M[V] = 18$  км/ч (5 м/с); скоростной 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).

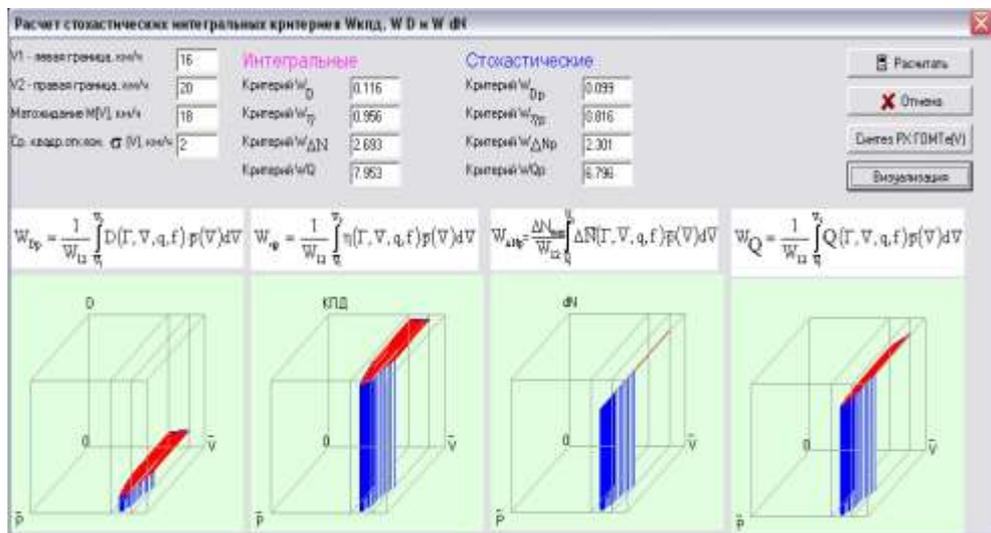
На рис. 4, б представлены значения среднеинтегральных критериев  $W_D$ ,  $W_\eta$ ,  $W_{AN}$ ,  $W_Q$  (второй столбец данных), вычисленные по результатам работ [6, 7]. На том же рисунке в третьем столбце данных приведены значения стохастических интегральных критериев, вычисленных по группе формул (1) – (3), (5) и их трехмерная визуализация.

Таким образом, научная новизна работы заключается в следующем – за счет предложенного нового интегрального критерия по топливной экономичности усовершенствована система критериев

для оценки эффективности работы бесступенчатых трансмиссий транспортных средств, позволяющая объективно сравнивать основные технико-экономические параметры трансмиссий и определять их рациональные (оптимальные) конструктивные параметры. Практическая значимость заключается в использовании усовершенствованной системы критериев для обоснования типа трансмиссии, обеспечивающей необходимое тяговое усилие и бесступенчатое регулирование скорости движения транспортного средства в заданном диапазоне при работе дизельного двигателя с постоянной частотой вращения коленвала, обеспечивающей минимальные выбросы и потребление топлива.



а) полный к.п.д. (1), динамический фактор (2), мощность тепловыделений (3), почасовой расхода топлива (4)



б) визуализация интегральных стохастических критериев

Рис. 4. Интегральные стохастические критерии для ступенчатой механической трансмиссии

**Выводы и перспективы использования.**

1. Для механических трансмиссий колесных и гусеничных транспортных средств модернизированы и обобщены интегральные стохастические критерии по тяговой динамике  $W_{Dp}$ , по к.п.д.  $W_{np}$ , по мощности тепловыделений  $\Delta N$  в трансмиссии  $W_{\Delta Np}$ .

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 и ступенчатых трансмиссий в составе тягового транспорта система предложенных интегральных стохастических критериев качества, позволяющая провести объективное сравнение альтернативных вариантов трансмиссий, будет иметь решающее значение.

1. Самородов В.Б. Проблемы и направление теоретических исследований в области гидрообъемно-механических трансмиссий в Украине // *Механика и машиностроение.* –1998.–№1. – С.105-109.
2. Самородов В.Б. Оптимизация передаточных отношений механической ступенчатой трансмиссии по критерию наилучшей тяговой динамики транспортной машины // *Информационные технологии: наука, техника, технология, оборудование, здоровье.* – Харьков, 1997. –С.371-377.
3. Самородов В.Б. Алгоритм оптимизации передаточных отношений механической ступенчатой трансмиссии по критерию наилучшей тяговой динамики гусеничной машины // *Вісник ХДПУ. Збірник наукових праць.*– Харків: ХДПУ.– 1999. – Вип 36. – С.135-140.
4. Самородов В.Б., Новикова Л.В., Полунин В.Г. О рациональном выборе передаточных отношений планетарных рядов гидрообъемно-механической трансмиссии транспортной машины // *Конструирование и исследование тракторов.*– Харьков: Вища школа.– 1985.– Вып.6.–С.45-48.
5. Таран И.А. Конструктивные параметры двухпоточных гидрообъемно-механических и электрических бесступенчатых трансмиссий шахтных дизелевозов / И.А. Таран // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2011. – № 1. – С. 105 – 108.
6. Таран И.А. Система интегральных стохастических критериев для трансмиссий транспортных средств / И.А. Таран // *Наукові нотатки.* – 2010. – Вип. 28. – С. 519 – 523.
7. Таран И.А. Среднеинтегральный КПД бесступенчатых двухпоточных трансмиссий шахтного дизелевоза / И.А. Таран // *Матеріали Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф. «Сучасні технології в промисловому виробництві».* – Суми: Сумський державний університет, 2010. – Ч. II. – С. 155 – 156.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2014