

УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 62-52

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.01.08

*A. C. КУЦЕНКО, С. В. КОВАЛЕНКО***ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Рассматривается актуальная задача оптимального выбора передаточных чисел трансмиссии транспортных средств (ТС), оснащенных двигателями внутреннего сгорания (ДВС) со ступенчатой коробкой передач, по критерию минимального расхода топлива. Анализ научно-технической литературы показал отсутствие простых и достаточно обоснованных алгоритмов управления энергоустановкой автомобиля, представляющей собой систему, состоящую из ДВС и регулируемой трансмиссии. Целью настоящей работы является теоретическое обоснование закона переключения передаточных чисел ступенчатой трансмиссии, обеспечивающего максимальную топливную экономичность для любого мощного и скоростного режима ТС. В основу предлагаемого метода положено однопараметрическое множество линейных преобразований, связывающих момент двигателя и его частоту вращения с тяговым усилием и скоростью ТС. Множество передаточных чисел трансмиссии соответствует множеству одноэкстремальных функций удельных расходов топлива. Множество точек линий равных уровней расходов топлива, соответствующих двум соседним значениям передаточных чисел трансмиссии, образует линию переключения передач. Предложен соответствующий алгоритм переключения передаточных чисел, обеспечивающий наиболее экономичное функционирование энергоустановки ТС в условиях переменных силовых и скоростных режимов.

Ключевые слова: автоматическая трансмиссия, оптимальное управление, транспортное средство, универсальная характеристика двигателя, линия переключения передач, топливная экономичность.

*O. C. КУЦЕНКО, С. В. КОВАЛЕНКО***ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ СТУПІНЧАТОЮ ТРАНСМІСІЄЮ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Розглядається актуальна задача оптимального вибору передавальних чисел трансмісії транспортних засобів (ТЗ), оснащених двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) із ступінчастою коробкою передач, за критерієм мінімальної витрати палива. Аналіз науково-технічної літератури показав відсутність простих і досить обґрунтованих алгоритмів управління енергоустановкою автомобіля, що представляє собою систему, яка складається з ДВЗ та регульованої трансмісії. Метою цієї роботи є теоретичне обґрунтування закону перемикання передавальних чисел ступінчастої трансмісії, що забезпечує максимальну паливну економічність для будь-якого потужного і швидкісного режиму ТЗ. В основу запропонованого методу покладено однопараметричну множину лінійних перетворень, що пов'язують момент двигуна та його частоту обертання з тяговим зусиллям та швидкістю ТЗ. Множині передавальних чисел трансмісії відповідає множина одноекстремальних функцій питомих витрат палива. Множина точок ліній рівних рівнів витрат палива, що відповідають двом сусіднім значенням передавальних чисел трансмісії, утворює лінію перемикання передач. Запропоновано відповідний алгоритм перемикання передавальних чисел, що забезпечує найбільш економічне функціонування енергоустановки ТЗ в умовах змінних силових і швидкісних режимів.

Ключові слова: автоматична трансмісія, оптимальне управління, транспортний засіб, універсальна характеристика двигуна, лінія перемикання передач, паливна економічність.

*O. S. KUTSENKO, S. V. KOVALENKO***OPTIMAL CONTROL OF A STEP-BY-STEP TRANSMISSION OF VEHICLES**

The actual problem of optimal selection of means of transport (MT) gear ratios, equipped with internal combustion engines (ICE) with a step-by-step gearbox according to the criterion of minimum fuel consumption is considered in the article. An analysis of the scientific and technical literature has showed the absence of simple and sufficiently justified algorithms for controlling the vehicle's power plant, which is a system that consists of an ICE and an adjustable transmission. The aim of this work is the theoretical justification of the law of gear ratios shifting of a step-by-step transmission, ensuring maximum fuel efficiency for any power and speed mode of MT. The proposed method is based on set of linear transformations that connect the engine moment and engine speed with a traction force and a speed of MT. The set of gear ratios correspond to the set of one-extremal functions of specific fuel consumptions. The set of points of equal levels lines corresponding to two neighboring values of the gear ratios of the transmission forms a gear shift line. An appropriate algorithm for switching gear ratios is proposed, which ensures the most efficient operation of a power plant of MT in conditions of variable power and speed modes.

Keywords: automatic transmission, optimal control, vehicle, universal engine performance, gear shift line, fuel efficiency.

Введение. Скорость автомобиля и тяговое усилие на его колесах во время движения изменяются в широких диапазонах. Эти изменения обусловлены

различными дорожными и погодными условиями, взаимодействием с другими участниками дорожного движения, а также требованиями к интенсивности

© A. C. Куценко, С. В. Коваленко, 2020

выполнения транспортной работы. Для увеличения диапазона тягового усиления на колесах со стороны двигателя широкое распространение получили механические коробки передач, обладающие высоким коэффициентом полезного действия и надежностью. Управление транспортным средством с двигателем внутреннего сгорания и механической коробкой передач заключается в рациональном сочетании выбранного передаточного числа и положения органа управления топливоподачей. Правильный выбор необходимого передаточного отношения позволяет с одной стороны максимально реализовать динамические качества транспортного средства, а с другой – повысить топливную экономичность и снизить выбросы вредных веществ с отработавшими газами.

Особенно важными эти обстоятельства представляются при городском движении, когда двигатель в основном работает на частичных режимах нагружения. Ниже будет рассмотрен один из возможных подходов к проблеме выбора необходимой передачи в зависимости от скорости движения и требуемого усилия на колесах автомобиля, исходя из требований максимальной экономичности энергоустановки.

Анализ исследований и публикаций. Проблеме рационального конструирования трансмиссии транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания и организации процесса управления энергоустановкой в целом посвящено множество публикаций, что явилось закономерным следствием совершенствования автомобильного транспорта в направлении автоматизации процессов управления основными силовыми элементами – двигателем и трансмиссией. Исторически сложилось так, что задача управления частотой вращения и мощностью двигателей внутреннего сгорания стала одной из основополагающих для интенсивного развития теории автоматического управления [1, 2]. В подавляющем большинстве работ по автоматическому управлению ДВС рассматривался как объект управления не связанный с трансмиссией. Взаимодействие с трансмиссией было представлено в виде момента сопротивления, приведенного к коленчатому валу ДВС, и рассматривалось в качестве возмущающего воздействия.

Аналогичным образом, фундаментальные исследования в области трансформации механической энергии, вырабатываемой ДВС, сформированные в основополагающей теории силового потока [3], развивались применительно к трансмиссии как отдельному элементу энергосилового системы автомобиля.

Повышение требований к экономичности автотранспорта и концентрации выбросов токсических компонент продуктов сгорания привело к необходимости привлечения системного подхода к проблеме конструирования и эксплуатации энергосиловых установок автомобилей. Системный подход, прежде всего, коснулся вопросов проектирования энергосилового агрегата «ДВС – трансмиссия».

Так в работах [4–7] обобщены исследования, связанные с созданием теоретических и расчетных методов анализа и синтеза параметров энергосилового

установки автомобиля, оптимизации ряда передаточных чисел коробки передач и законов переключения. В работе [4] предложен обобщенный критерий оптимальности, включающий экономичность при городской езде и магистральном движении, при фиксированных скоростях и других характерных режимах движения. Задача оптимизации предложенного критерия рассматривалась в условиях ограничений на тягово-скоростные свойства автомобиля, обусловленные характеристикой ДВС. Основным недостатком рассматриваемого подхода является субъективность выбора весовых коэффициентов, формирующих обобщенный критерий на основе частных.

В работах [8, 9] проведен глубокий анализ и математическое моделирование процессов в системе «ДВС – механическая трансмиссия – автомобиль». Предложена библиотека алгоритмов управления коробкой передач, ориентированная на конечный набор типичных ситуаций возникающих на практике: плавный старт, разгон, переключение передач. В основу проектирования положена многокритериальная постановка задачи оптимизации ряда передаточных чисел коробки передач, которая сводится к Парето множеству вариантов. Выбор конкретного решения предлагается искать на основе субъективного принятия решения.

Основным недостатком исследований [4–9] и аналогичных им является ориентация на математическую модель автомобиля как механической системы, содержащей множество конструктивных параметров, часть которых известна приближенно.

Кроме того, совершенно не учитываются процессы изменения конструктивных параметров автомобиля при эксплуатации, а следовательно, и влияние этих изменений на величину выбранных критериев оптимизации. Иными словами – сложность математической модели и многокритериальность задач оптимизации не позволяют надеяться на обоснованное решение реальной практической задачи управления системой «ДВС – трансмиссия – автомобиль».

В противовес описанному выше направлению исследований в работах [10, 11, 12] рассматривается упрощенный подход к управлению энергоустановкой автомобиля. Так в работе [11] автором предложен способ повышения топливной экономичности ДВС путем организации работы двигателя на режимах, соответствующих характеристике минимальных значений удельного эффективного расхода топлива с применением универсальной характеристики двигателя. Автором предложен метод выбора передаточного числа коробки передач, обеспечивающего наиболее экономичный режим работы двигателя путем сравнения удельных эффективных расходов топлива на альтернативных передачах.

В [12] предлагается минимизировать расход топлива путем поддержания режимов соответствующих экономической характеристике выбором оптимального передаточного числа с одновременным воздействием на систему управления топливоподачей. Такой подход может быть реализован только в случае

бесступенчатой (электрической, гидравлической) трансмиссии.

Цель и задачи исследования. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что отсутствуют практически реализуемые методы и алгоритмы автоматического управления энергосиловой установкой автомобиля, обеспечивающие наибольшую экономичность в нестационарных условиях скорости и мощности ТС. Как следует из статистических данных [13] совместное распределение скорости и мощности автомобиля при городской езде имеет широкий разброс во всем допустимом диапазоне функционирования энергоустановки. Каждому из режимов ТС может соответствовать множество значений коэффициента передачи трансмиссии. Обоснование выбора наилучшего, с точки зрения экономичности, значения передаточного

числа трансмиссии из заданного дискретного множества и составляет цель настоящего исследования.

Математическая модель транспортной энергоустановки. Режим работы ДВС характеризуется в основном двумя параметрами: M – эффективным моментом вала и ω – угловой скоростью коленчатого вала. Далее пару $(M, \omega) = \mathbf{x}$ будем называть вектором состояния ДВС. В силу различных физических обстоятельств [1] на вектор \mathbf{x} наложен ряд ограничений, т.е. $\mathbf{x} \in \Gamma$, где Γ – заданная область на плоскости (M, ω) , имеющая структуру, изображенную на рис. 1.

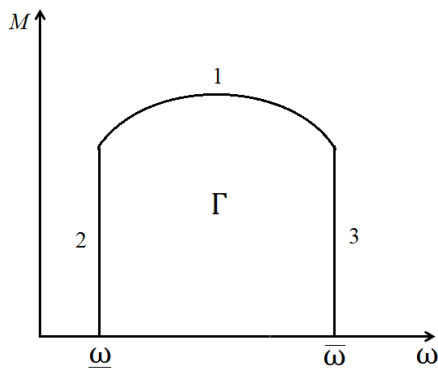


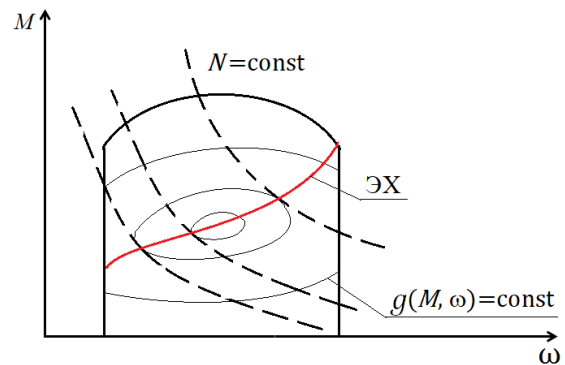
Рис. 1. Область допустимых значений вектора состояния ДВС

Область Γ ограничена внешней характеристикой двигателя – 1, минимальной $\underline{\omega}$ и максимальной $\bar{\omega}$ частотами вращения – линии 2 и 3 соответственно.

Множеству точек $(M, \omega) \in \Gamma$ можно поставить в соответствие функцию $g(M, \omega)$, представляющую собой удельный расход топлива, затраченного на единицу вырабатываемой эффективной мощности ДВС. Функция $g(M, \omega)$ определяется экспериментально для каждого типа двигателя и, как правило, задается в виде множества линий равных удельных расходов внутри области Γ . Функция $g(M, \omega)$ обычно одноэкстремальна и имеет минимум внутри Γ . Линии уровня типичной функции $g(M, \omega)$ показаны на рис. 2.

Кроме линий уровня $g(M, \omega) = \text{const}$ на рис. 2 приведено семейство линий равной мощности

$$N = M\omega = \text{const}.$$



Множество точек касания линий уровня $g(M, \omega)$ и линий уровня $N(M, \omega)$ образуют так называемую экономическую характеристику (ЭХ), характеризующуюся минимальным расходом топлива для заданной мощности.

По аналогии с вектором состояния двигателя введем вектор состояния транспортного средства $\mathbf{y} = (F, V)$, представляющий собой тяговое усилие F и скорость движения V . Будем в дальнейшем предполагать, что все величины M, ω, F, V заданы в безразмерных относительных координатах. Векторы \mathbf{y} и \mathbf{x} связаны между собой передаточными числами k трансмиссии

$$\begin{aligned} F &= kM, \\ V &= k^{-1}\omega, \end{aligned} \quad (1)$$

или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} F \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k & 0 \\ 0 & k^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M \\ \omega \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Преобразование (2) $\mathbf{y} = \varphi_k(\mathbf{x})$ обладает следующими свойствами: оно отображает гиперболы в гиперболы, взаимно однозначно и линейно, а определитель его матрицы (2) $\det \text{diag}\{k, k^{-1}\} = 1$. Таким образом, преобразование $\varphi_k(\mathbf{x})$ унитарно. Преобразование (2) отображает прямые линии в прямые, а прямые, параллельные координатным осям, в аналогичные прямые. Кроме того, преобразование φ_k сохраняет площадь замкнутой фигуры.

В результате преобразования φ_k область Γ отобразится в область Γ_k на плоскости (F, V) . Соответствующим образом отобразятся также и линии уровня $g(M, \omega) = \text{const}$. Взаимно однозначное соответствие между точками областей Γ и Γ_k определяет соответствие между параметрами нагрузки двигателя в установившемся режиме при передаточном отношении трансмиссии k .

Рассмотрим теперь множество $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$ передаточных чисел трансмиссии, расположенных в порядке убывания. Каждому k_i соответствует преобразование вида (2) φ_{k_i} , а каждому φ_{k_i} соответствует область Γ_{k_i} – отображение Γ на плоскость (F, V) с

передаточным числом k_i . Объединение множеств Γ_{k_i} (рис. 3) представляет собой множество допустимых режимов транспортной системы Γ_Σ

$$\Gamma_\Sigma = \bigcup_{i=1}^n \Gamma_{k_i}.$$

Область Γ_Σ при любом наборе k_i ($i = 1, \dots, n$) удовлетворяет условию

$$\Gamma_\Sigma \subset \Gamma_{\max},$$

где Γ_{\max} – область, ограниченная гиперболой максимальной мощности N_{\max} и координатными осями.

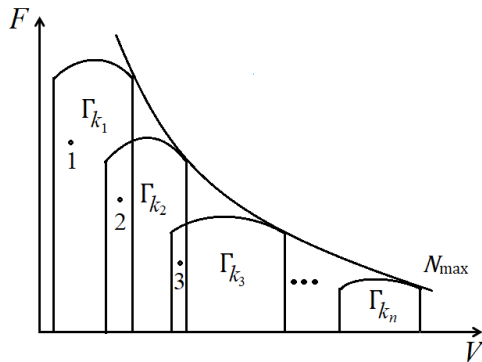


Рис. 3. Множество допустимых режимов транспортного средства при n -ступенчатой трансмиссии

Построение линии переключения передач. Как видно из рис. 3 один и тот же вектор режима транспортного средства может быть реализован при различных значениях передаточных чисел. Так режимы 2 и 3 могут быть реализованы при двух значениях передаточных чисел, а режим 1 – только при одном значении из возможных передаточных чисел.

Возникает естественная задача выбора передаточного числа трансмиссии из множества допустимых, при котором экономичность двигателя будет максимальной для заданного вектора режима (F, V) . Ограничимся случаем выбора из двух возможных альтернатив, характеризующихся передаточными числами k_1 и k_2 . На рис. 4 приведены допустимые области Γ_1 и Γ_2 использования передаточных чисел k_1 и k_2 соответственно

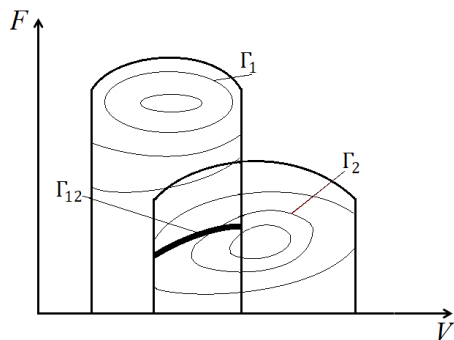


Рис. 4. Допустимые области вектора состояния транспортного средства при двух передаточных числах

Область альтернативного выбора Γ_{12} представляет собой пересечение $\Gamma_{12} = \Gamma_1 \cap \Gamma_2$. Объединение областей $\Gamma_1 \cup \Gamma_2$ представляет область допустимых режимов с передаточными числами k_1 или k_2 . Область $\Gamma_1 \setminus (\Gamma_1 \cap \Gamma_2)$ представляет собой область, в которой можно использовать только передаточное число k_1 , а $\Gamma_2 \setminus (\Gamma_1 \cap \Gamma_2)$ – только k_2 .

Таким образом, задача выбора оптимального передаточного числа, обеспечивающего минимальный расход топлива в области режимов Γ_{12} , сводится к разделению Γ_{12} на две подобласти Γ_{12}^1 и Γ_{12}^2 , которым соответствуют передаточные числа k_1 и k_2 , минимизирующие величину $g(M, \omega)$.

Для нахождения областей Γ_{12}^1 и Γ_{12}^2 построим на плоскости (F, V) функции $G^1(F, V)$ и $G^2(F, V)$, соответствующие преобразованиям ϕ_{k_1} и ϕ_{k_2} функции $g(M, n)$. Соответствующие линии уровня G^1 и G^2 приведены на рис. 4. Уравнения поверхностей $G^1(F, V)$ и $G^2(F, V)$ примут вид

$$G^1(F, V) = g\left(\frac{F}{k_1}, k_1 V\right), \quad (3)$$

$$G^2(F, V) = g\left(\frac{F}{k_2}, k_2 V\right). \quad (4)$$

Приравняв удельные расходы G^1 и G^2 между собой, получим уравнение линии переключения передач L в координатах (F, V) , представляющую собой множество точек пересечения линий равного уровня функций $G^1(F, V)$ и $G^2(F, V)$ (рис 4).

Из (3) и (4) следует, что уравнение линии переключения имеет вид

$$g\left(\frac{F}{k_1}, k_1 V\right) = g\left(\frac{F}{k_2}, k_2 V\right). \quad (5)$$

Линия L является границей разделения области Γ_{12} на подобласти Γ_{12}^1 и Γ_{12}^2 .

Поскольку по оси абсцисс область Γ_{12} ограничена величинами V_2 и V_1 , соответствующими минимальной и максимальной частотам вращения двигателя на 2-й и 1-й передачах соответственно, то линию переключения L следует дополнить линиями L_1 и L_2 (рис. 5), на которых необходимо осуществлять переключение передач в связи с ограничениями по допустимой частоте вращения двигателя.

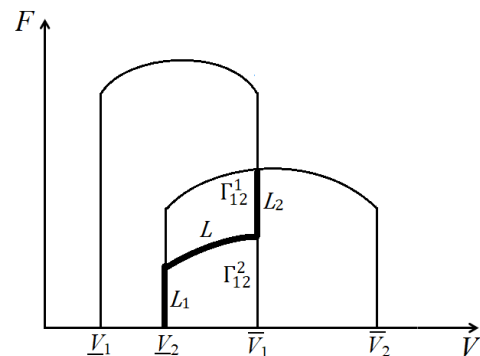


Рис. 5. Линия переключения передач

Таким образом, составную линию $L_{\Sigma} = L_1 L_2$ можно рассматривать как суммарную линию переключения передач с учетом как экономического фактора, так и фазовых ограничений на процесс управления. Окончательно закон управления передаточным числом трансмиссии примет вид

$$k = \begin{cases} k_1 & \text{при } \omega \in \Gamma_1 \setminus \Gamma_{12}^2, \\ k_2 & \text{при } \omega \in \Gamma_2 \setminus \Gamma_{12}^1. \end{cases} \quad (6)$$

Для реализации процесса управления трансмиссией более удобно представлять линию переключения передач (6) в координатах (M, ω) , соответствующих ДВС. Для этого подставим в выражение (5) отображения (1). Естественно, что линия переключения передач в пространстве (M, ω) будет иметь два образа, соответствующих передаточным числам k_1 и k_2

$$g(M, \omega) = g\left(\frac{k_1}{k_2} M, \frac{k_2}{k_1} \omega\right), \quad (7)$$

$$g(M, \omega) = g\left(\frac{k_2}{k_1} M, \frac{k_1}{k_2} \omega\right), \quad (8)$$

получающихся в результате подстановки в (5) соотношений (1) для передаточных чисел k_1 и k_2 . Образы линии переключения L (5) и (6), а также линий L_1 и L_2 – ограничений по частотам вращений коленчатого вала на соответствующих передачах представлены на рис 6.

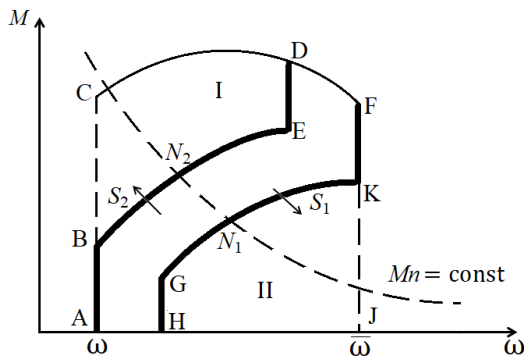


Рис. 6. Линия переключения передач на плоскости (M, ω)

Линия ABED соответствует уравнению (5) и представляет собой отображение линии переключения передач $L_1 L_2$ (рис. 5) при работе транспортного средства на 2 передаче. Соответственно область ABEDFJ – это область режимов двигателя, при которых необходимо использовать 2 передачи. Аналогично линия HGK представляет собой линию переключения передач при работе ТС на 1 передаче, а область ACFKGH – область допустимых режимов при использовании 1 передачи. Каждой точке N_1 линии переключения GK соответствует точка N_2 линии BE, лежащая на гиперболе равных мощностей $(M, \omega) = \text{const}$, проходящей через точку N_1 .

С помощью линии переключения, перестроенной в координаты (M, ω) , можно рекомендовать алгоритм переключения передач, обеспечивающий минимальный расход топлива. Этот алгоритм с равным успехом

может быть использован как при ручном, так и при автоматическом переключении передач. Суть алгоритма заключается в переключении передач с 1 на 2 при переходе линии GK в направлении S_1 (рис. 6) и в обратном переключении при переходе линии BE в направлении S_2 .

Заключение. Предложенный в статье метод поиска лучшего по экономичности значения из двух возможных передаточных чисел трансмиссии можно распространить на более общую задачу – выбора значения передаточного числа из всего допустимого дискретного набора.

Алгоритм переключения передач, основанный на предложенном методе, ориентирован, прежде всего, на автоматическое переключение передач, а также может быть положен в основу подсказывающей системы при ручном управлении механической коробкой передач автомобиля.

Список літератури

1. Крутов В. И. *Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания*. Москва: Машиностроение, 1968. 535 с.
2. Айзерман М. А. *Теория автоматического регулирования двигателей*. Москва: Гостеоиздат, 1952. 510 с.
3. Антонов А. С. *Силовые передачи колесных и гусеничных машин. Теория и расчет*. Москва: Машиностроение, 1976. 477 с.
4. Филькин Н. М., Шаихов Р. Ф., Буянов И. П. *Основы теории исследования эксплуатационных свойств автомобиля*. Пермь: Пермская ГСХА, 2016. 241 с.
5. Кондрашкин А. С., Умняшкин В. А., Филькин Н. М. Оптимизация законов переключения передач. *Автомобильная промышленность*. 1988. № 10. С. 19–20.
6. Кондрашкин А. С., Филькин Н. М. Расчет оптимальных моментов переключения передач при разгоне. *ЭВМ в исследованиях работы АТС. Межвузовский сборник научных трудов*. Москва: МИП. 1988. С. 45–48.
7. Павленко А. В. Метод определения ряда передаточных чисел трансмиссии на ранних этапах проектирования. *Сборник научных трудов ХНАДУ*. 2001. Вып. 7–8. С. 100–102.
8. Павловский В. Е., Огольцов В. Н., Огольцов Н. С. Система управления нижнего уровня для автомобиля с механической трансмиссией. *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша*. 2013. № 103. 28 с.
9. Сахно В. П., Корнач А. А. Определение передаточных чисел трансмиссии при условии минимального расхода топлива в установившемся движении автомобиля. *Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки»*. Киев: НТУ. 2015. Вып. 1(31). С. 469–475.
10. Красневский Л. Г. Автоматические трансмиссии как средство повышения энергоэффективности силовых установок мобильных машин. *Перспективные материалы и технологии: сборник материалов международного симпозиума*. Витебск: УО «ВГТУ», 2015. С. 125–129.
11. Кузнецов А. Г. Анализ возможности работы двигателя с минимальным расходом топлива. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2015. № 7. С. 52–57.
12. Леонов И. В. Алгоритм управления экономичностью силового агрегата с дизельным двигателем. *Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2018. № 1. С. 83–91.
13. Стечкин Б. С. *Теория тепловых двигателей. Избранные труды*. Москва: Наука, 1977. 410 с.

References (transliterated)

1. Krutov V. I. *Avtomaticheskoe regulirovanie dvigatelej vnutrennego sgoranija* [Automatic control of internal combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 535 p.
2. Aizerman M. A. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovanija dvigatelej* [Theory of automatic regulation of engines]. Moscow, Gosteorizdat Publ., 1952. 510 p.

3. Antonov A. S. *Silovye peredachi kolesnyh i gusenichnyh mashin. Teoriya i raschet* [Power transmission of wheeled and tracked vehicles. Theory and calculation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 477 p.
4. Filkin N. M., Shaikhov R. F., Buyanov I. P. *Osnovy teorii issledovaniya jekspluatatsionnyh svoystv avtomobilja* [Fundamentals of the theory of the study of operational properties of a car]. Perm, Perm State Agricultural Academy Publ., 2016. 241 p.
5. Kondrashkin A. S., Umnyashkin V. A., Filkin N. M. Optimizatsija zakonov pereklyucheniya peredach [Optimization of the laws of gear shifting]. *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 1988, vol. 10, pp. 19–20.
6. Kondrashkin A. S., Filkin N. M. Paschet optimal'nyh momentov pereklyucheniya peredach pri razgone [Calculation of the optimal moments of gear shifting during acceleration]. *EVM v issledovaniakh raboty ATS. Mezhhuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Computers in the study of the operation of automatic telephone exchanges. Interuniversity collection of scientific papers]. Moscow, MIP Publ., 1988, pp. 45–48.
7. Pavlenko A. V. Metod opredeleniya rjada peredatochnykh chisel transmissii na rannih etapah proektirovaniya [Method for determining a number of transmission ratios at the early stages of design]. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers]. 2001, issue 7–8, pp. 100–102.
8. Pavlovsky V. E., Ogoltsov V. N., Ogoltsov N. S. *Sistema upravleniya nizhnego urovnja dlja avtomobilja s mehanicheskoy transmissiej* [Lower level control system for a car with a mechanical transmission]. KIAM Preprints M. V. Keldysh Publ., 2013, vol. 103, 28 p.
9. Sakhno V. P., Kornach A. A. Opredelenie peredatochnykh chisel transmissii pri uslovii minimal'nogo rashoda topliva v ustanovivshemsja dvizhenii avtomobilja [Determination of gear ratios of a transmission under the condition of minimum fuel consumption in steady-state vehicle movement]. *Vestnik Nacional'nogo transportnogo universiteta. Serija "Tehnicheskie nauki"* [Bulletin of the National Transport University. Series "Engineering"]. Kiev, NTU Publ., 2015, issue 1 (31), pp. 469–475.
10. Krasnevsky L. G. Avtomaticheskie transmissii kak sredstvo povysheniya jergojeffektivnosti silovykh ustanovok mobil'nyh mashin [Automatic transmissions of KA means of increasing the energy efficiency of power plants of mobile machines]. *Perspektivnye materialy i tehnologii: sbornik materialov mezhdunarodnogo simpoziuma* [Advanced Materials and Technologies: a collection of the international symposium materials]. Vitebsk, UO "VGTU", 2015, pp. 125–129.
11. Kuznetsov A. G. Analiz vozmozhnosti raboty dvigatelja s minimal'nyim rashodom topliva [Analysis of engine operation with minimum fuel consumption]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering]. 2015, no. 7, pp. 52–57.
12. Leonov I. V. Algoritm upravleniya jekonom ichnost'ju silovogo agregata s dizel'nyim dvigatelem [The algorithm for controlling the efficiency of a power unit with a diesel engine]. *Vestnik MGTU im. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of MSTU. Bauman. Ser. Mechanical engineering]. Moscow, 2018, no. 1, pp. 83–91.
13. Stechkin B. S. *Teoriya teplovykh dvigatelej. Izbrannye trudy* [Theory of heat engines. Selected Works]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 410 p.

Поступила (received) 05.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Куценко Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Коваленко Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8763-0862; e-mail: adbc@ukr.net.

Куценко Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Коваленко Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-8763-0862; e-mail: adbc@ukr.net.

Kutsenko Oleksandr Sergiyovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: kuzenko@kpi.kharkov.ua.

Kovalenko Serhii Volodymyrovich – PhD, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8763-0862; e-mail: adbc@ukr.net.