

EDN: ZGTZWS

УДК 62-585.2

Н. В. САВЕНКОВ, Д. К. ЧЕПИЖКО, С. Р. ПАПАКИН, А. В. КИРЕЕВФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. о. Макеевка, г. Макеевка

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ, ОСНАЩЕННОЙ РОБОТИЗИРОВАННОЙ КОРОБКОЙ ПЕРЕДАЧ

Аннотация. Для автомобилей, оснащенных силовой установкой, содержащей двигатель внутреннего сгорания и роботизированную коробку передач, разработан численный алгоритм ее рационального регулирования на основе одного из выбранных критериев эффективности при движении в условиях стандартизированного ездового цикла. Создана соответствующая программа, листинг простейшего варианта которой в программной среде компьютерной алгебры Mathcad приведен в статье. Алгоритм позволяет работать с заданными различными способами функциями скоростными характеристиками двигателя, а также с характеристиками потерь мощности в коробке передач при различном числе ступеней переднего хода. Результаты позволяют получать любые из расчетных режимных параметров и показателей рабочего процесса силовой установки в каждой точке последовательности неустановившихся режимов движения автомобиля, например, ездового цикла.

Ключевые слова: автомобиль, роботизированная коробка передач, ездовой цикл, критерий оптимизации, расход топлива, передаточное число, алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Роботизированные коробки перемены передач (РКП) достаточно распространены в конструкции современного автомобиля. Ключевые отличия от традиционной механической ступенчатой коробки передач (КП) – наличие систем автоматического управления механизмами сцепления, а также выбора и переключения передач. Соответственно, РКП – это ступенчатая механическая КП с автоматическим управлением. В настоящее время относительно распространены два типа РКП: преселективные (оснащенные механизмом двойного сцепления) и оснащенные одинарным сцеплением [1].

ЦЕЛЬ

Разработка численного алгоритма рационального регулирования работы силовой установки, содержащей ДВС и роботизированную коробку передач, на основе одного из выбранных критериев эффективности при движении в условиях стандартизированного ездового цикла.

ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ

Основное преимущество преселективных КП это сравнительно небольшое время переключения передач (до 0,1...0,2 с) и практически полное отсутствие при этом разрывов энергосилового потока. Наиболее распространенными серийными моделями преселективных РКП являются: DSG фирмы Volkswagen, I-Shift Dual Clutch фирмы Volvo, PDK фирмы Porsche, Alfa TCT фирмы Alfa Romeo, PowerShift фирмы Ford, Twin-Clutch SST фирмы Mitsubishi. Наиболее существенные недостатки – значительное усложнение конструкции по сравнению с традиционной двух- и трехвальной КП и более высокая стоимость [2].

Для РКП с одинарным сцеплением основным достоинством является простота конструкции, которая повторяет устройство механической ступенчатой КП и может быть разработана на основе ее серийной



модели. К РКП этого типа относятся: MultiMode фирмы Toyota, Easytronic фирмы Opel, Allshift фирмы Mitsubishi, I-Shift фирмы Volvo и т. д.

Кроме того, РКП при относительно невысокой стоимости обладают наиболее высоким КПД сравнительно с другими типами трансформаторов крутящего момента (коробок передач), имеющих автоматическое управление. В последние десятилетия это в совокупности с интенсивным развитием мехатронных систем и ЭВМ [3] обусловило относительно широкое распространение автомобильных трансмиссий, оснащенных РКП.

Конкурентоспособность автотранспортного средства определяется совокупностью факторов, основными среди которых, при условии удовлетворения требований комплексной безопасности в эксплуатационных условиях, являются: удельная производительность и топливная экономичность (энергетическая эффективность), безотказность, долговечность и ремонтпригодность, а также эргономика, эстетические качества и рыночная ликвидность.

Многие из перечисленных эксплуатационных свойств автомобиля ключевым образом определяются характеристиками его силовой установки, под которой подразумевается совокупность агрегатов, узлов и механизмов, обеспечивающих процессы превращения и передачи энергии от источника к ведущим колесам, в том числе и характеристиками применяемого трансформатора крутящего момента:

- 1) диапазоном и плотностью (рядом) передаточных чисел;
- 2) реализуемым алгоритмом управления;
- 3) быстродействием механизма изменения передаточного числа;
- 4) величинами сопутствующих потерь мощности;
- 5) металлоёмкостью, технологичностью, ресурсом и т. д.

При этом, если позиции 3–5 обусловлены типом и уровнем технического совершенства КП, то характеристики 1–2 должны быть выбраны в соответствии с некоторым критерием эффективности эксплуатации автомобиля. Известно множество подходов и соответствующих методов для выбора данного критерия, в соответствии с которыми в его качестве могут быть приняты: путевой расход топлива в стандартизированном ездовом цикле [4, 5], комплексный топливо-экологический критерий [6], наивысшие тягово-скоростные свойства и т. д. [7, 8]. В подавляющем большинстве этот выбор обусловлен категорией автомобиля, его назначением, условиями официального утверждения и эксплуатации.

Стоит отметить, что позиция 1 – диапазон и плотность ряда передаточных чисел для ступенчатых КП выбирается на этапе проектирования. В настоящей статье этот процесс именуется процессом первого уровня. Реализуемый алгоритм управления, позиция 2, для КП с автоматическим управлением в процессе эксплуатации может быть адаптивным. Разработка данного алгоритма рассматривается в качестве процесса второго уровня.

Для автомобиля с классической силовой установкой, содержащей один ДВС и трансмиссию и не имеющей систем рекуперации энергии, показатели тягово-скоростных и топливно-экономических эксплуатационных свойств, а также экологических качеств в i -й режимной точке определены зависимостями [4, 9]:

$$C_{im}, G_i, N_{ei} = f(\omega, k, \varepsilon, \lambda); \quad (1)$$

$$N_{ti} = N_{ei}(\omega, k, \varepsilon, \lambda) \times \eta_T(U_T, M_1, \omega, \varepsilon); \quad (2)$$

$$V_i = f(\omega, U_T); \quad (3)$$

$$j_i = f(\varepsilon, U_T), \quad (4)$$

где C_{im} – выброс m -го компонента продуктов сгорания топлива ДВС, г/с;

G_i – текущее значение расхода топлива ДВС, г/с;

N_{ei} – развиваемая эффективная мощность нетто, кВт;

N_{ti} – мощность, сообщаемая ведущим колесам;

η_T – КПД трансмиссии;

M_1 – крутящий момент на входе в КП;

V_i, j_i – скорость и ускорение автомобиля;

ω, k – угловая скорость коленчатого вала и коэффициент использования мощности ДВС;

ε и λ – первые производные по времени ω и k : угловое ускорения коленчатого вала и скорость изменения нагрузки ДВС;

U_T – кинематическое передаточное число трансмиссии.

Соответствующие интегральные показатели, выбор которых в качестве критериев эффективности процесса движения автомобиля обоснован в работах [4, 6, 8] представлены зависимостями:

$$t = \int_{V_H}^{V_K} \frac{1}{j_i(V)}(t)dV, [c]; \tag{5}$$

$$m_{al} = \int_0^{t_u} G_i(t)dt, [г/ездовой цикл]; \tag{6}$$

$$M_m = \int_0^{t_u} C_{im}(t)dt, [г/ездовой цикл] \text{ или } [г/км], \tag{7}$$

где t – время разгона автомобиля от скорости V_H до скорости V_K ;
 m_{al} и M_m – путь расход топлива и удельный выброс m -го компонента отработавших газов ДВС в условиях ездового цикла общей продолжительностью t_u .

С целью аналитического решения оптимизационных задач по процессам первого либо второго уровня, функции (1)–(4) и (5)–(7), в зависимости от выбранного критерия, должны быть выражены через варьируемые параметры (передаточных чисел, скоростей переключения передач и т. д.). Ввиду сложности этих функций, а также их возможное представление в виде кусочно-заданных функций (сплайнов и т. д.), а также дискретных зависимостей, полученных в результате выполнения экспериментальных исследований, рассматриваемые задачи оптимизации целесообразно решать численными методами.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Обоснование алгоритма

В настоящей работе, в качестве примера, приведен разработанный и реализованный в программной среде компьютерной алгебры Mathcad, простейший алгоритм (рисунок), осуществляющий оптимизационный процесс второго уровня – принятие решения о необходимости изменения передачи в РКП в зависимости от заданных параметров неустановившегося режима движения автомобиля: скорости V , ускорения j и мощности N_t на ведущих колесах, по условию минимизации критерия (6).

$$Z(V, N_t, j) := \begin{array}{l} \omega_k \leftarrow \frac{V \cdot U_\Gamma}{r_k} \qquad \qquad \qquad 1 \\ N_{cy} \leftarrow \frac{N_t}{\eta_\Gamma} \qquad \qquad \qquad 2 \\ G \leftarrow 1000 \qquad \qquad \qquad 3 \\ z \leftarrow 0 \qquad \qquad \qquad 4 \\ \text{for } i \in U_5, U_4, U_3, U_2, U_1 \qquad \qquad \qquad 5 \\ \left| \begin{array}{l} \omega \leftarrow \frac{V \cdot U_\Gamma \cdot i}{r_k} \qquad \qquad \qquad 6 \\ \varepsilon \leftarrow \frac{j \cdot U_\Gamma \cdot i}{r_k} \qquad \qquad \qquad 7 \\ (\text{break}) \text{ if } \omega > \omega_{\max} \qquad \qquad \qquad 8 \\ k \leftarrow h_k \qquad \qquad \qquad 9 \\ \text{while } M_l(\omega, k, \varepsilon) \cdot i \cdot \eta_T(U_T, M_l, \omega, \varepsilon) < N_{cy}/\omega_k \qquad \qquad \qquad 10 \\ \left| \begin{array}{l} k \leftarrow k + h_k \qquad \qquad \qquad 11 \\ (\text{break}) \text{ if } k > 1 \qquad \qquad \qquad 12 \end{array} \right. \\ z \leftarrow i \wedge G \leftarrow G(\omega, k, \varepsilon) \text{ if } G > G(\omega, k, \varepsilon) \wedge (h_k \leq k \leq 1 \wedge \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}) \qquad \qquad \qquad 13 \end{array} \right. \\ z \qquad \qquad \qquad 14 \end{array}$$

Рисунок – Листинг программы Mathcad для рационального управления РКП на неустановившемся режиме движения автомобиля.

Итерационный цикл алгоритма состоит из 14-ти строк. Программа позволяет определить значение параметра вывода « Z », в качестве которого в строке № 13 может быть выбран оптимизируемый параметр i (текущее передаточное число РКП из заданного ряда U_1, U_2, U_3, U_4, U_5) или один из определяемых им режимных параметров или показателей силовой установки: $k, \omega, \varepsilon, N_e, M_1, G, \eta_T$. В строках № 1–4 выполняется расчёт и присвоение значений исходным параметрам и показателям: частоты вращения выходного вала РКП « ω_k » (через кинематический радиус ведущего колеса r_k и передаточное число главной передачи U_T), мощности силового агрегата « N_{cy} », начального значения расхода топлива « G », начального значения параметра вывода « Z ». Строки № 5–14 являются телом базового итерационного цикла «for», который выполняет количество повторений, соответствующее числу передач переднего хода в РКП с целью поиска такого значения i , обеспечивающего минимальный расход G (строка № 13) с учетом принятой системы ограничений. Строки № 9–12 являются встроеным итерационным циклом «while», который предназначен для обеспечения тождественности уравнения силового баланса автомобиля, т. е. для нахождения единственного возможного для текущего значения « i » сочетания параметров регулирования ДВС – « ω » и « k » (строка № 10).

Это реализуется перебором значений « k » с шагом h_k (строки № 9 и № 11). Система ограничений алгоритма (строки № 8, 12, 13) включает проверку для каждой расчётной итерации принадлежности режимных параметров k и ω допустимым диапазонам их возможных значений ($h_k \leq k \leq 1$; $\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$, где ω_{\min} и ω_{\max} соответственно задаваемые минимальная и максимальная угловая скорость коленчатого вала ДВС). Необходимый баланс между точностью и скоростью работы программы, что актуально при определении выбранного в качестве примера значения критерия (6), может быть достигнут за счёт рационального выбора шага h_k .

В случае представления конструктивных параметров U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 (для 5-ти ступенчатой РКП) или U_T в качестве дополнительных аргументов функции Z и решения относительно введенных аргументов интегралов (5)–(7), то в зависимости от выбранного критерия, возможно осуществлять оптимизацию по процессу второго уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанного простейшего алгоритма (рисунок) могут быть разработаны программы для рационального выбора параметров ступенчатой КП с ручным управлением (при введении дополнительных ограничений на диапазоны возможных значений режимных параметров ДВС [10,11]), а также для бесступенчатых трансмиссий (при значительном увеличении числа возможных значений параметра i).

Результаты работы предложенного алгоритма могут быть положены в основу операционной карты электронного блока управления силовой установкой, содержащей автоматическую коробку передач, в т. ч. РКП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heisler, H. Advanced Vehicle Technology / H. Heisler. – 2 ed. – Oxford [etc.] : Butterworth – Heinemann, 2002. – 663 p. – ISBN 0-7506-5131-8. – Текст : непосредственный.
2. Volvo Trucks. Driving Progress. Технические данные. Коробка передач АТО3512F. – Текст : электронный // stpi.it.volvo.com : [сайт]. – 2016. – 4 с. – URL: https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/ATO3512F_Rus_01_306008984.pdf (дата обращения: 10.01.2021).
3. Попов, Д. В. Адаптация алгоритмов работы электронных блоков управления бензиновых двигателей при работе на газовом топливе / Д. В. Попов, Д.Ф. Курочкин. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2019. – Выпуск 2019-4(138) Научно-технические достижения студентов строительно-архитектурной отрасли. – С. 124–126. – URL: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2019/vestnik_2019-4\(138\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2019/vestnik_2019-4(138).pdf) (дата обращения: 10.03.2024). – ISSN 25192817.
4. Савенков, Н. В. Метод выбора передаточных чисел силовой установки автомобиля категории N_1 на основе ездового цикла : специальность 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Савенков Никита Владимирович ; Московский автомобильно-дорожный государственный университет. – Москва, 2017. – 206 с. – Текст : непосредственный.
5. Русаков, С. С. Разработка методики оптимизации передаточных чисел механической ступенчатой трансмиссии легкового автомобиля с учетом режимов работы его двигателя : специальность 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Русаков Сергей Сергеевич ; Ижевский государственный технический университет. – Ижевск, 2007. – 134 с. – Текст : непосредственный.
6. Адясов, А. Ю. Разработка методики выбора передаточных чисел трансмиссии автомобиля на основе рационального сочетания тягово-скоростных свойств, топливной экономичности и токсичности выхлопных газов : специальность 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» : диссертация на соискание ученой степени канди-

- дата технических наук / Адясов Александр Юрьевич ; Нижегородский государственный технический университет. – Нижний Новгород, 2002. – 200 с. – Текст : непосредственный.
7. Наркевич, Э. И. Методы комплексного исследования тягово-скоростных свойств и топливной экономичности городских автобусов специальность 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Наркевич Эдуард Иванович. – Москва, 1982. – 16 с. – Текст : непосредственный.
 8. Анискин, Л. Г. Методика выбора передаточных чисел трансмиссии автомобиля, обеспечивающих его разгон за минимальное время / Л. Г. Анискин, Х. Д. Квитко. – Текст : непосредственный // Автомобильная промышленность. – 1963. – № 10. – С. 25–29.
 9. Работа автомобильного двигателя на неуставившемся режиме / Е. М. Акатов, П. М. Белов, Н. Х. Дьяченко, В. С. Мусатов. – Москва, Ленинград : Машгиз, 1960. – 282 с. – Текст : непосредственный.
 10. ГОСТ Р 59890-2021. Автомобильные транспортные средства. Выбросы загрязняющих веществ с обработавшими газами. Технические требования и методы испытаний на базе всемирной согласованной процедуры испытания транспортных средств малой грузоподъемности и испытаний в реальных условиях эксплуатации = Motor vehicles. Emissions of pollutants from exhaust gases. Technical requirements and test methods based on the worldwide harmonized procedure for testing light-duty vehicles and tests under real operating conditions : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 ноября 2021 г. № 1604-ст : введен впервые : дата введения 2022-04-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ"» (ФГУП «НАМИ»). – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – Текст : непосредственный.
 11. ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний = Motor vehicles. Fuel efficiency. Test methods : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1178-ст : введен впервые : дата введения 2022-09-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ"» (ФГУП «НАМИ»). – Москва : Стандартиформ, 2012. – Текст : непосредственный.

Получена 13.05.2024

Принята 24.05.2024

NIKITA SAVENKOV, CHERIZHKO DAVID, SERGEY PAPAKIN, ALEKSEY KIREEV
DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR RATIONAL REGULATION OF AN
AUTOMOBILE POWER PLANT EQUIPPED WITH A ROBOTIC GEARBOX
FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture», Russian Federation,
Donetsk People's Republic, Makeevka

Abstract. For cars equipped with a power plant containing an internal combustion engine and a robotic gearbox, a numerical algorithm for its rational regulation has been developed based on one of the selected efficiency criteria when driving in a standardized driving cycle. A corresponding program has been created, the listing of the simplest version of which in the Mathcad computer algebra software environment is given in the article. The algorithm allows you to work with the speed characteristics of the engine set in various ways, as well as with the characteristics of power losses in the gearbox with a different number of forward stages. The results allow us to obtain any of the calculated operating parameters and indicators of the working process of the power plant at each point in the sequence of unsteady driving modes of the car, for example, a driving cycle.

Keywords: car, robotic gearbox, driving cycle, optimization criterion, fuel consumption, gear ratio, algorithm.

Савенков Никита Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: нестационарные режимы движения автотранспортных средств.

Чепижко Давид Константинович – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: методы выбора рациональных параметров роботизированных коробок передач автотранспортных средств.

Папакин Сергей Русланович – магистрант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: алгоритмы рационального регулирования автомобильных силовых установок, оснащенных роботизированной коробкой передач.

Киреев Алексей Витальевич – ассистент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: силовые агрегаты на альтернативных видах топлива, автоматические трансмиссии.

Savenkov Nikita – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, FSBE HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: non-stationary modes of movement of vehicles

Chepizhko David – master’s student, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, FSBE HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: methods for selecting rational parameters for robotic gearboxes of vehicles.

Papakin Sergey – master’s student, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, FSBE HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: algorithms for rational regulation of automotive power plants equipped with a robotic gearbox.

Kireev Aleksey – an assistant, of the Department of Automotive Transport, Service and Operation, FSBE HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: power units using alternative fuels, automatic transmissions.