

# УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ И ПЕРЕДАТОЧНЫМИ ЧИСЛАМИ АГРЕГАТОВ ТРАНСМИССИИ АВТОБУСА

д.т.н. **Кравец В.Н.**, д.т.н. **Мусарский Р.А.**, к.т.н. **Тумасов А.В.**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

vnkravets@yandex.ru, musarsky@list.ru, anton.tumasov@nntu.ru

*Конструкторы Группы ГАЗ разработали на базе грузового автомобиля ГАЗон Next 10 семейство автобусов ГАЗ Вектор Next 10. Параметры двигателя, агрегатов трансмиссии и колес нового семейства автобусов претерпели существенные изменения, что неизбежно повлияло на показатели их топливной экономичности. В связи с этим были сформулированы цели настоящей работы, заключающиеся в разработке методики определения показателей топливной экономичности автобуса и установлении зависимостей между этими показателями и передаточными числами агрегатов трансмиссии. Объектом исследования выбрана базовая модель семейства автобусов, предназначенных для внутригородских перевозок пассажиров. Для оценки топливной экономичности автобуса выбраны единичные показатели: расходы топлива при заданных скоростях и эксплуатационный расход топлива при эксплуатационной скорости. Эти показатели определены по графикам топливно-экономических характеристик автобуса. В статье изложены методики построения названных графиков и определения по ним показателей топливной экономичности автобуса. Установлено влияние на расход топлива при заданных скоростях 60 и 80 км/ч величин передаточных чисел высшей ступени пяти- и шестиступенчатой коробки передач и главной передачей с передаточными числами 3,9 и 4,55. Определены передаточные числа коробки передач и главной передачи, при которых автобус расходует наибольшее и наименьшее количество топлива на 100 км пути. Показано, что изменение передаточных чисел агрегатов трансмиссии несущественно влияет на эксплуатационный расход топлива автобуса. Результаты исследований, выполненных авторами статьи, могут быть использованы разработчиком для оптимизации передаточных чисел модернизируемого семейства автобусов ГАЗ Вектор Next 10.*

**Ключевые слова:** автобус, трансмиссия автобуса, механическая ступенчатая коробка передач, главная передача, топливная экономичность автобуса, единичные показатели топливной экономичности автобуса, топливно-экономическая характеристика установившегося движения.

## **Актуальность и цели исследования**

В 2018 г. конструкторы Группы ГАЗ разработали на базе модернизированного грузового автомобиля ГАЗон Next 10 [1] семейство автобусов ГАЗ Вектор Next 10, предназначенных для выпуска на Павловском автобусном заводе (ООО «Павловский автобус»).

На автобусах семейства ГАЗ Вектор Next 10 установлен более мощный, чем у предшествующей модели, дизельный двигатель с турбонаддувом Ярославского моторного завода, шины меньшей размерности, чем у грузового автомобиля. Разработаны варианты автобусов с пяти- и шестиступенчатой коробками передач и главными передачами, имеющими передаточные числа 3,9 и 4,55.

Изменение параметров двигателя, колес и агрегатов трансмиссии повлияло на показатели топливной экономичности модернизированного семейства автобусов, в связи с чем были сформулированы цели настоящей работы:

- 1) разработка методики определения показателей топливной экономичности автобуса;
- 2) установление зависимостей между показателями топливной экономичности и передаточными числами агрегатов трансмиссии автобуса.

Выполненное авторами исследование актуально и своевременно, так как его результаты позволят разработчику более обоснованно решить проблему оптимизации параметров трансмиссии модернизируемого семейства автобусов.

### Описание объекта исследования

В качестве объекта исследования выбрана базовая модель семейства автобусов ГАЗ Вектор Next 10, предназначенная для внутригородских перевозок пассажиров. Данное транспортное средство относится к категории  $M_2$  по международной и современной отечественной классификации автотранспортных средств.

Исследование выполнено с использованием следующих исходных данных:

- полная масса  $m_a = 10\,000$  кг;
- двигатель дизельный с турбонаддувом ЯМЗ-53445-20, максимальная стендовая мощность  $P_{e\max}^c = 125$  кВт (170 л.с.) при частоте вращения  $n_{eP} = 2300$  об/мин, максимальный стендовый крутящий момент двигателя  $T_{e\max}^c = 650$  Н·м при частоте  $n_{eT} = 1200\text{...}1600$  об/мин, минимальный удельный эффективный расход топлива двигателя  $g_{e\min}^c = 194$  г/(кВт·ч) при частоте  $n_{eg} = 1200$  об/мин, удельный эффективный расход топлива двигателя при максимальной мощности  $g_{eP}^c = 218$  г/(кВт·ч) при частоте  $n_{eP} = 2300$  об/мин;
- коэффициент коррекции стендовой характеристики двигателя  $k_c = 0,95$ ;
- коробка передач механическая ступенчатая с двумя вариантами передаточных чисел: вариант 1 – пятиступенчатая с передаточными числами  $u_{kI} = 6,555$ ;  $u_{kII} = 3,933$ ;  $u_{kIII} = 2,376$ ;  $u_{kIV} = 1,422$ ;  $u_{kV} = 1,000$ ;
- вариант 2 – шестиступенчатая с передаточными числами  $u_{kI} = 6,555$ ;  $u_{kII} = 3,933$ ;  $u_{kIII} = 2,376$ ;  $u_{kIV} = 1,422$ ;  $u_{kV} = 1,000$ ;  $u_{kVI} = 0,782$ ;
- главная передача с двумя вариантами передаточных чисел: вариант 1 –  $u_0 = 3,9$ ; вариант 2 –  $u_0 = 4,55$ ;
- коэффициент полезного действия трансмиссии  $\eta_{TP} = 0,87$ ;
- шины бескамерные низкопрофильные 245/70R19,5, статический радиус колес  $r_{ст} = 0,409$  м, динамический радиус колес  $r_d = 0,409$  м, радиус качения колес  $r_k = 0,425$  м;
- коэффициент сопротивления качению  $f = 0,01$ ;
- параметры обтекаемости: коэффициент обтекаемости  $c_x = 0,46$ ; плотность воздуха  $\rho_v = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>; площадь миделя  $A_B = 3,8$  м<sup>2</sup>; фактор обтекаемости  $W = 1,07$  (Н·с<sup>2</sup>)/м<sup>2</sup>;
- плотность дизельного топлива  $\rho_T = 860$  кг/м<sup>3</sup>.

### Методика выполнения исследований

Для оценки топливной экономичности исследуемого автобуса были приняты единичные показатели названного эксплуатационного свойства, содержащиеся в нормативных документах [2, 3]:

1) расходы топлива при заданных скоростях  $Q_{S1}$  и  $Q_{S2}$ ;

2) эксплуатационный расход топлива  $Q_{Sэ.р.}$ .

Для определения перечисленных показателей и для общей оценки топливной экономичности автобуса рассчитаны и построены графики топливно-экономических характеристик его установившегося движения при различных величинах передаточных чисел коробки передач и главной передачи.

Как известно, топливно-экономическая характеристика установившегося движения транспортного средства – это зависимость путевого расхода топлива  $Q_s$  от скорости  $V_a$  при установившемся движении ( $V_a = \text{const}$ ) на дорогах с различными коэффициентами сопротивления  $\psi$ . Топливо-экономические характеристики исследуемого автобуса рассчитаны и построены по методике, изложенной в литературе по теории автомобиля [4–9]. С целью повышения точности расчетов в известную методику авторы внесли некоторые коррективы.

Из теории автомобиля [6] известно, что путевой расход топлива транспортного средства прямо пропорционален удельному расходу топлива двигателя  $g_d$ , который зависит от частоты вращения вала и нагрузки двигателя. При выполнении данной работы удельный расход двигателя [г/(кВт·ч)] определяли с использованием приближенной аналитической методики по выражению:

$$g_d = g_{eP}^c K_E K_I,$$

где  $g_{eP}^c$  – удельный эффективный расход топлива двигателя при максимальной мощности, [г/(кВт·ч)];  $K_E = f(E)$  – коэффициент, учитывающий степень использования частоты вращения вала двигателя  $E$ ;  $K_I$  – коэффициент, учитывающий степень использования мощности двигателя  $I$ .

Аналитические зависимости  $K_E = f(E)$  и  $K_I = f(I)$ , полученные Гришкевичем А.И. [8] в 1980-х гг., на основании исследований, выполненных учеными кафедры «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, которые

показали неудовлетворительные результаты для современных автомобильных двигателей при расчете зависимости  $K_{И} = f(I)$ . С учетом этого обстоятельства авторы выполнили расчет зависимости  $K_E = f(E)$  по полиному третьего порядка, предложенному Гришквичем А.И.:

$$K_E = 1,25 - 0,99E + 0,98E^2 - 0,24E^3,$$

а при расчете зависимости  $K_{И} = f(I)$  использовали полином пятого порядка, введенный в теорию автомобиля Песковым В.И. [9] для дизельных двигателей:

$$K_{И} = 3,52 - 17,24I + 44,85I^2 - 55,28I^3 + 31,23I^4 - 6,08I^5.$$

Топливо-экономические характеристики автобуса ГАЗ Вектор *Next 10* построены при нескольких значениях коэффициента сопротивления дороги  $\psi$ . Начальное значение этого коэффициента  $\psi_1$  соответствует движению автобуса по горизонтальной ровной дороге с твердым асфальтобетонным или цементобетонным покрытием. При этом коэффициент сопротивления дороги равен коэффициенту сопротивления качению, то есть  $\psi_1 = f = 0,01$ . Конечное значение коэффициента сопротивления дороги  $\psi_{max} = D_{max}$ , где  $D_{max}$  – максимальный динамический фактор автобуса на расчетной ступени коробки передач. В диапазоне между начальным  $\psi_1$  и конечным  $\psi_{max}$  значениями выбрано несколько промежуточных величин  $\psi_2, \psi_3, \dots, \psi_m$  с интервалом не более 0,01.

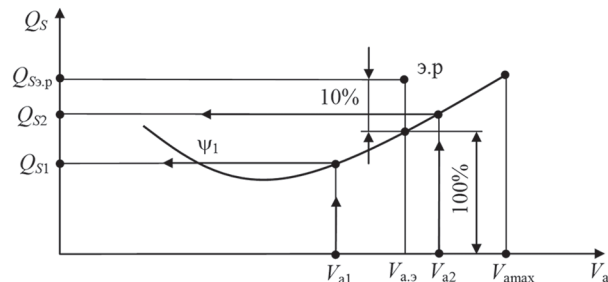
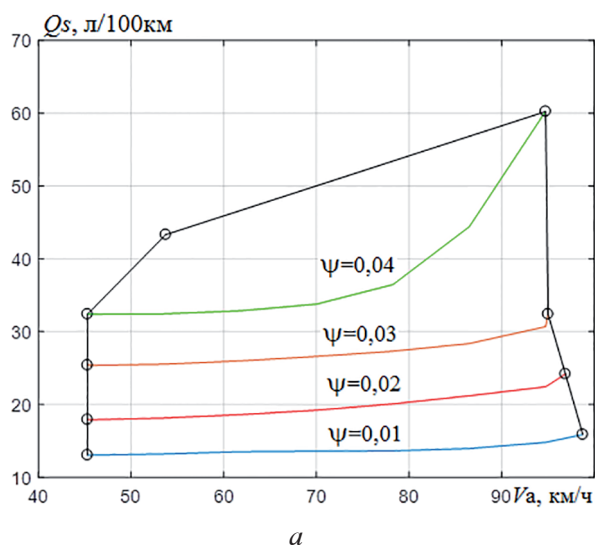


Рис. 1. Методика определения путевого расхода топлива при заданных скоростях движения и эксплуатационного расхода топлива автобуса

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011 [2] для транспортных средств категории  $M_2$  заданные скорости составляют  $V_{a1} = 60$  км/ч и  $V_{a2} = 80$  км/ч. Путевые расходы топлива  $Q_{S1}$  и  $Q_{S2}$  при этих скоростях определены по зависимости путевого расхода топлива  $Q_S = f(V_a)$  от скорости  $V_a$  установившегося движения при коэффициенте сопротивления дороги  $\psi_1$  (рис. 1).

Эксплуатационный расход топлива  $Q_{Sэ,р}$  (рис. 1) примерно на 10 % больше расхода топлива по топливо-экономической характеристике установившегося движения по горизонтальной ровной дороге с твердым покрытием ( $\psi_1 = f = 0,01$ ) при эксплуатационной скорости  $V_{aэ}$ , которая для транспортного средства с дизельным двигателем составляет три четверти максимальной скорости  $V_{amax}$  [8].

### Результаты исследования

На рис. 2 и 3 показаны топливо-экономические характеристики автобуса ГАЗ Вектор

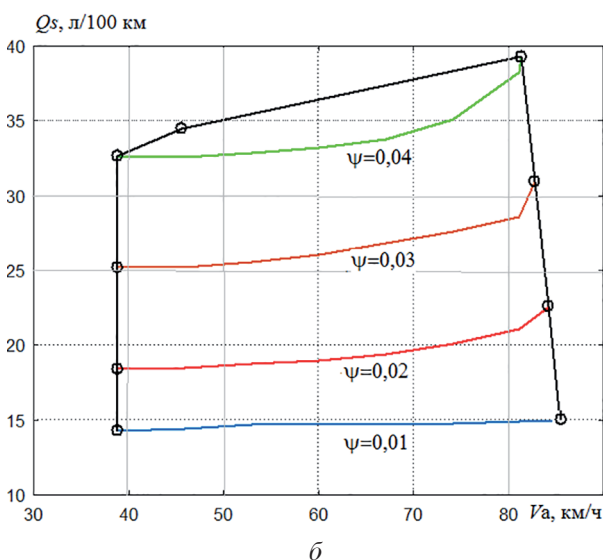
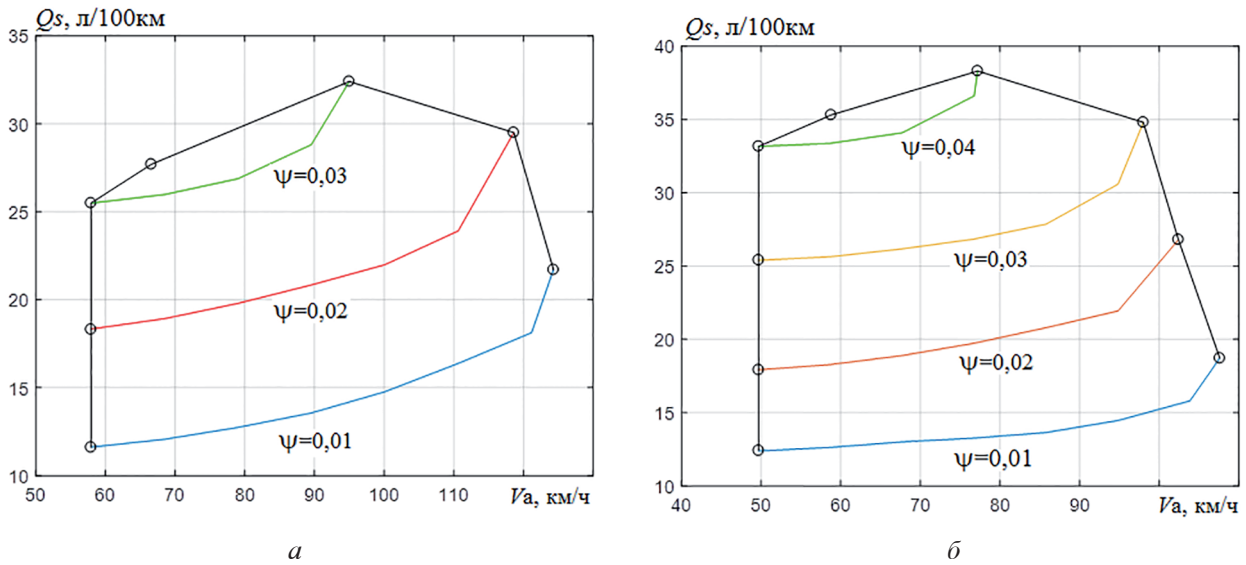


Рис. 2. Топливо-экономическая характеристика автобуса на пятой ступени пятиступенчатой коробки и при главной передаче:  $a$  – с передаточным числом 3,9;  $b$  – с передаточным числом 4,55



**Рис. 3. Топливо-экономическая характеристика автобуса на шестой ступени шестиступенчатой коробки и при главной передаче:**  
*a* – с передаточным числом 3,9; *б* – с передаточным числом 4,55

Next 10 при различных значениях передаточных чисел коробки передач и главной передачи.

В табл. 1 приведены величины путевого расхода топлива автобуса при заданных скоростях движения и различных передаточных числах агрегатов трансмиссии.

В табл. 2 содержатся данные об эксплуатационном расходе топлива и эксплуатационной скорости автобуса при различных значениях передаточных чисел агрегатов трансмиссии.

**Выводы**

1. Уменьшение передаточного числа главной передачи с 4,55 до 3,9 (на 14,3 %) снизило путе-

вой расход топлива на пятой ступени пятиступенчатой коробки передач при скорости 60 км/ч с 14,4 до 13,5 л/100 км (на 6,3 %) и при скорости 80 км/ч с 14,7 до 13,3 л/100 км (на 6,8 %), а у автобуса с шестиступенчатой коробкой передач на шестой ступени при скорости 60 км/ч с 12,6 до 12,2 л/100 км (на 3,2 %) и при скорости 80 км/ч с 13,4 до 12,9 л/100 км (на 3,7 %).

2. У автобуса с шестиступенчатой коробкой передач по сравнению с автобусом с пятиступенчатой коробкой передач путевой расход топлива на высшей ступени коробки передач ниже при передаточном числе главной передачи 3,9 и скорости 60 км/ч на 9,6 %, а при скоро-

Таблица 1

Путевой расход топлива при заданных скоростях движения и различных передаточных числах трансмиссии

Заданные скорости, км/ч	Путевой расход топлива, л/100 км, при передаточных числах трансмиссии			
	$u_{кV} = 1,000$ $u_0 = 3,9$	$u_{кV} = 1,000$ $u_0 = 4,55$	$u_{кVI} = 0,782$ $u_0 = 3,9$	$u_{кVI} = 0,782$ $u_0 = 4,55$
60	13,5	14,4	12,2	12,6
80	13,7	14,7	12,9	13,4

Таблица 2

Эксплуатационный расход топлива топлива и эксплуатационная скорость автобуса при различных значениях передаточных чисел агрегатов трансмиссии

Передаточные числа трансмиссии							
$u_{кV} = 1,000$ $u_0 = 3,9$		$u_{кV} = 1,000$ $u_0 = 4,55$		$u_{кVI} = 0,782$ $u_0 = 3,9$		$u_{кVI} = 0,782$ $u_0 = 4,55$	
Эксплуатационные расход топлива и скорость							
$Q_{Sэ,р}$ , л/100 км	$V_{а.э}$ , км/ч	$Q_{Sэ,р}$ , л/100 км	$V_{а.э}$ , км/ч	$Q_{Sэ,р}$ , л/100 км	$V_{а.э}$ , км/ч	$Q_{Sэ,р}$ , л/100 км	$V_{а.э}$ , км/ч
15,0	74,0	16,0	64,2	13,4	93,3	14,0	80,6



сти 80 км/ч – на 5,8 %; при передаточном числе главной передачи 4,55 и скорости 60 км/ч на 12,6 %, а при скорости 80 км/ч – на 8,8 %.

3. Наименьший путевой расход топлива у автобуса на шестой ступени шестиступенчатой коробки передач и передаточном числе главной передачи 3,9: 12,2 л/100 км при скорости 60 км/ч и 12,9 л/100 км при скорости 80 км/ч. Наибольший путевой расход топлива на пятой ступени пятиступенчатой коробки передач и передаточном числе главной передачи 4,55: 14,4 л/100 км при скорости 60 км/ч и 14,7 л/100 км при скорости 80 км/ч.

4. Изменение передаточных чисел агрегатов трансмиссии не оказывает существенного влияния на эксплуатационный расход топлива автобуса. При изменении передаточного числа главной передачи с 4,55 до 3,9 на пятой ступени пятиступенчатой коробки передач он уменьшается с 16 до 15 л/100 км (на 6,3 %), а на шестой ступени шестиступенчатой коробки передач – с 14 до 13,4 л/100 км (на 4,3 %).

5. Результаты и выводы данной работы могут быть использованы разработчиком для оптимизации передаточных чисел агрегатов трансмиссии модернизируемого семейства автобусов ГАЗ Вектор *Next 10*.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель *Next* с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года № 218).

### Литература

1. Кравец В.Н., Мусарский Р.А. Зависимость показателей топливной экономичности грузового автомобиля от параметров его трансмиссии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4 (127). С. 158–166.
2. ГОСТ Р 54810–2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2012. 22 с.
3. Кравец В.Н. Измерители эксплуатационных свойств автотранспортных средств. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. 157 с.
4. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля. СПб.: БХВ – Петербург. 2006. 487 с.
5. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 391 с.
6. Кравец В.Н., Селифонов В.В. Теория автомобиля. М.: ООО «Гринлайт+». 2011. 884 с.
7. Кравец В.Н., Мусарский Р.А., Песков В.И., Тумасов А.В. Курсовые работы по теории автомобиля. В 2 ч. Ч. 1. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. 294 с.
8. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория. Минск: Вышэйшая школа. 1986. 208 с.
9. Песков В.И., Кузьмин Н.А. Расчетные исследования эксплуатационных характеристик автомобиля. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. 212 с.

### References

1. Kravets V.N., Musarskiy R.A. The dependence of the fuel economy of a truck on the parameters of its transmission. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseyeva*. 2019. No 4 (127), pp. 158–166 (in Russ.).
2. *GOST R 54810–2011*. Automotive vehicles. Fuel efficiency. Test methods. Moscow: Standartinform Publ. 2012. 22 p.
3. Kravets V.N. *Izmeriteli ekspluatatsionnykh svoystv avtotransportnykh sredstv* [Measuring instruments of operational properties of vehicles]. N. Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseyeva Publ. 2014. 157 p.
4. Tarasik V.P. *Teoriya dvizheniya avtomobilya* [Theory of vehicle movement]. SPb.: BKHV – Peterburg Publ. 2006. 487 p.
5. Larin V.V. *Teoriya dvizheniya polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [The theory of movement of all-wheel drive vehicles]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ. 2010. 391 p.
6. Kravets V.N., Selifonov V.V. *Teoriya avtomobilya* [Automobile theory]. Moscow: ООО «Grinlayt+» Publ. 2011. 884 p.
7. Kravets V.N., Musarskiy R.A., Peskov V.I., Tumasov A.V. *Kurovyye raboty po teorii avtomobilya* [Term papers on automobile theory]. V 2 ch. Ch. 1. N. Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseyeva Publ. 2019. 294 p.
8. Grishkevich A.I. *Avtomobili. Teoriya* [Automobiles. Theory]. Minsk: Vysh-eyshaya shkola Publ. 1986. 208 p.
9. Peskov V.I., Kuz'min N.A. *Raschetnyye issledovaniya ekspluatatsionnykh kharakteristik avtomobilya* [Design studies of vehicle performance]. N. Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseyeva Publ. 2018. 212 p.

## ESTABLISHING RELATIONSHIPS BETWEEN FUEL ECONOMY AND GEAR RATIOS OF BUS TRANSMISSION UNITS

DSc in Engineering **V.N. Kravets**, DSc in Engineering **R.A. Musarskiy**, PhD in Engineering **A.V. Tumasov**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
vnkravets@yandex.ru, musarsky@list.ru, anton.tumasov@nntu.ru

*The engineers of the GAZ Group developed the GAZ Vector Next 10 family of buses on the basis of the GAZon Next 10 truck. The parameters of the engine, transmission units and wheels of the new family of buses undergone significant changes, which inevitably affected their fuel economy. In this regard, the objectives of this work were formulated as the development of a methodology for determining the fuel economy of a bus and establishing relationships between these indicators and the gear ratios of transmission units. The base model of a family of buses designed for intercity passenger transportation was selected as the object of study. To assess the fuel economy of the bus, single indicators were selected: fuel consumption at given speeds and operating fuel consumption at operating speed. These indicators are determined by the graphs of the fuel and economic characteristics of the bus. The article sets out the methods for constructing the named graphs and determining the indicators of the fuel economy of the bus. The effect on the fuel consumption at given speeds of 60 and 80 km/h of gear ratios of the highest stage of five – and six-speed gearboxes and final drive with gear ratios of 3,9 and 4,55 is established. The gear ratios of the gearbox and final drive at which the bus consumes the largest and least amount of fuel per 100 km of track are determined. It is shown that a change in the gear ratios of the transmission units does not significantly affect the operational fuel consumption of the bus. The results of studies performed by the authors of the article can be used by the developer to optimize the gear ratios of the modernized GAZ family of buses Vector Next 10.*

**Keywords:** bus, bus transmission, mechanical step gearbox, final drive, bus fuel economy, individual indicators of bus fuel economy, fuel-economic characteristic of steady motion.