

**Н.М. Филькин**

Ижевский государственный технический университет  
им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ  
ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ  
ПО КРИТЕРИЯМ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ  
И ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ**

На примере легкового автомобиля рассмотрена многокритериальная методика оптимизации передаточных чисел ступенчатых трансмиссий транспортных машин, реализованная в виде комплекса программных средств на ПЭВМ.

**Ключевые слова:** трансмиссия, передаточные числа, оптимизация, топливная экономичность, тягово-скоростные свойства.

**N.M. Fil'kin**

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
Izhevsk, Russian Federation

**TECHNIQUE OF OPTIMIZATION OF VEHICLE POWERTRAIN  
GEAR RATIOS BY THE CRITERIA OF FUEL EFFICIENCY  
AND TRACTION-SPEED PROPERTIES**

Realized as a complex of software tools on PC the multicriteria technique of optimization of gear ratios of vehicles step-by-step powertrains by way of example of a car is examined in the article.

**Keywords:** powertrain, gear ratios, optimization, fuel efficiency, traction and speed properties.

В автомобилестроении улучшение показателей топливной экономичности и тягово-скоростных свойств вновь проектируемых автомобилей проводится по различным направлениям. Известно, что резервом улучшения указанных эксплуатационных свойств является реализация в конструкциях автомобилей оптимальных передаточных чисел трансмиссии.

Из-за многообразия условий эксплуатации и большого количества требований, предъявляемых к тягово-скоростным свойствам и топливной экономичности автомобиля, решить задачу оптимизации передаточных чисел трудно. Сложность решения задачи приводит к тому, что на практике при создании новой модели автомобиля конструкторы

предварительно рассчитывают ряд передаточных чисел трансмиссии по одной из известных методик, например, берут геометрический, динамический или какой-либо другой ряд передаточных чисел. Далее, в процессе создания нового автомобиля, рассчитанный ряд передаточных чисел корректируют на основе данных экспериментальных исследований опытных образцов автомобилей. Этот метод обоснования оптимальности передаточных чисел требует значительных временных и материальных затрат.

Следует, отметить, что расчет передаточных чисел начинается на раннем этапе создания автомобиля – на стадии разработки технического задания, так как уже на этом этапе необходимо знать максимальную скорость движения, время разгона до заданной скорости и другие параметры создаваемого автомобиля. Для определения указанных показателей необходимо проводить расчет передаточных чисел трансмиссии, согласующих характеристики предполагаемого двигателя, который будет применяться на проектируемом автомобиле, с характеристиками самого автомобиля. Если изменяются характеристики двигателя или характеристики автомобиля, то необходимо изменять значения передаточных чисел трансмиссии. Поэтому можно утверждать, что расчет и обоснование передаточных чисел трансмиссии проводятся на начальном этапе создания автомобиля, а также на этапе приемочных испытаний нового автомобиля с целью решения вопроса о постановке его на производство.

При оптимизации передаточных чисел трансмиссии автомобиля по топливной экономичности и тягово-скоростным свойствам предлагается в качестве частных критериев оптимальности брать показатели указанных эксплуатационных свойств: расход топлива при движении в городе, на магистральных дорогах и при движении автомобиля с постоянными скоростями; время разгона до заданных скоростей и на заданных участках разгона, максимальный преодолеваемый подъем; максимальная возможная скорость движения и др. Чем больше частных критериев рассматривается, тем с большей достоверностью мы можем судить о недостатках и преимуществах передаточных чисел, но при этом усложняется решение самой задачи оптимизации.

Количество критериев и их состав при оптимизации передаточных чисел трансмиссии зависят от типа транспортного средства и требований, предъявляемых к указанным эксплуатационным свойствам. Одновременно улучшать все показатели топливной экономичности и тягово-

скоростных свойств невозможно, так как многие критерии противоречивы. Например, улучшая динамику разгона за счет передаточных чисел трансмиссии, мы, как правило, ухудшаем топливную экономичность, и наоборот. Поэтому предлагается сводить многокритериальную задачу оптимизации передаточных чисел трансмиссии автомобиля к однокритериальной задаче оптимизации путем построения обобщенного критерия оптимальности, который представляет собой аддитивную функцию нормированных частных критериев оптимальности с соответствующими весовыми коэффициентами важности. Весовые коэффициенты важности предлагается определять экспертным методом.

Рассматриваемый подход к оптимизации передаточных чисел трансмиссии базируется на математических моделях расчета показателей топливной экономичности и тягово-скоростных свойств, которые рассматриваются как сложные нелинейные функции передаточных чисел трансмиссии автомобиля. Эти функции (частные критерии оптимальности) можно рассчитывать только на ПЭВМ. Например, чтобы рассчитать время разгона автомобиля с места с переключением передач до скорости 100 км/ч, необходимо смоделировать разгон автомобиля с учетом характеристик двигателя, процессов переключения передач, а для расчета показателя расхода топлива в городе – смоделировать движение автомобиля в городском ездовом цикле.

Предлагаемая методика оптимизации передаточных чисел трансмиссии реализована в виде пакета прикладных программ, который позволяет либо проводить расчет показателей топливной экономичности и тягово-скоростных свойств по заданным передаточным числам трансмиссии, либо проводить поиск оптимального сочетания передаточных чисел трансмиссии по указанным показателям эксплуатационных свойств автомобиля. В настоящее время в разработанном пакете прикладных программ используется 25 частных критериев оптимальности, которые рассматриваются как функции передаточных чисел трансмиссии: расходы топлива в различных городских и магистральных циклах, применяемых в России и за рубежом; расходы топлива при движении автомобилей с постоянными скоростями; время разгона с места с переключением передач до заданных скоростей и на заданных участках пути разгона; максимальный преодолеваемый подъем и др.

Если при расчете оптимальных передаточных чисел потребуются дополнительные критерии оптимальности, не реализованные на ПЭВМ в разработанном пакете прикладных программ, то можно дополни-

тельно разработать на ПЭВМ подпрограмму расчета этого частного критерия оптимальности и прикомпоновать ее к базовому пакету прикладных программ.

Основы многокритериальной методики оптимизации передаточных чисел трансмиссии были положены в [1], развиты и адаптированы для различных типов транспортных машин в [2, 3 и др.].

Множество частных критериев оптимальности можно разбить на две группы: критерии топливной экономичности; критерии тягово-скоростных свойств. В этом случае для каждой группы формируется групповой обобщенный критерий оптимальности, а далее строится обобщенный критерий топливной экономичности и тягово-скоростных свойств, который представляет собой сумму двух групповых критериев оптимальности с весовыми коэффициентами важности.

Определение весовых коэффициентов важности предлагается проводить по методике, изложенной ниже.

По результатам проведенных экспертиз строились матрицы экспертных оценок частных критериев оптимальности вида

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{m_0 1} & d_{m_0 2} & \dots & d_{m_0 n} \end{pmatrix},$$

где  $m_0$  – количество рассматриваемых частных критериев;  $n$  – количество экспертов;  $d_{ij}$  – экспертная оценка значения относительной важности  $i$ -го частного критерия, предложенная  $j$ -м экспертом.

Эксперт оценивает каждый частный критерий по 10-балльной системе. Проведение экспертного опроса рекомендуется проводить в соответствии с ГОСТ 23554.2–81 «Методы оценки уровня качества промышленной продукции. Основные положения».

Результаты экспертного опроса являются исходными данными для расчета весовых коэффициентов важности. Индивидуальные балльные оценки частных критериев оптимальности каждого эксперта нормировались. В результате нормирования сумма коэффициентов важности частных критериев приводилась к 100 %, т.е.

$$P_j = \sum_{i=1}^{m_0} d_{ij} = 100 \% \quad (j = \overline{1, n}).$$

Вычисление вектора  $\vec{d} = (d_1, d_2, \dots, d_{m_0})$  (коэффициентов важности) для матрицы  $D$  проводится по рекуррентным формулам:

$$\vec{d}_k = D \cdot D^T \cdot \vec{d}_{k-1} / C_k, \quad (1)$$

$$\vec{q}_k = D^T \cdot D \cdot \vec{q}_{k-1} / C_k, \quad (2)$$

где  $C_k = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_0} d_{ij} \left( \sum_{l=1}^n d_{il} \cdot q_l \right)$ ;  $D^T$  – матрица, транспонированная по отношению к матрице  $D$ ;  $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  – вектор коэффициентов компетентности экспертов.

На первом шаге итерации ( $k = 1$ ) предполагается, что коэффициенты компетентности всех экспертов равны  $1/n$ , т.е.  $\vec{q}_0 = (1/n, 1/n, \dots, 1/n)$ , а компоненты вектора  $\vec{d}_0 = d_1^0, d_2^0, \dots, d_{m_0}^0$  определяются по формуле

$$d_i^0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (i = \overline{1, m_0}).$$

На каждом последующем шаге ( $k = 2, 3, \dots$ ) векторы  $\vec{d}$  и  $\vec{q}$  определяются в соответствии с (1), (2). Условием окончания данного итерационного процесса расчета векторов коэффициентов компетентности экспертов и весовых коэффициентов важности частных критериев является одновременное выполнение неравенств:  $\sum_{j=1}^n (q_j^k - q_j^{k+1})^2 \leq e_q$ ,  $\sum_{i=1}^{m_0} (d_i^k - d_i^{k+1})^2 \leq e_d$ , где  $e_q$ ,  $e_d$  – погрешности суммы квадратов отклонений компонент векторов  $k$  и  $k + 1$  итераций.

В качестве примера приведем результаты оптимизации передаточных чисел трансмиссии для автомобиля ИЖ-2126. Их множества частных критериев оптимальности были сформированы две группы. Первая группа:  $G_1(i_1^{\text{TP}}, \dots, i_k^{\text{TP}})$ ,  $G_4(i_1^{\text{TP}}, \dots, i_k^{\text{TP}})$  – время разгона с места с переключением передач соответственно до скоростей движения 60 и 100 км/ч;  $G_8(i_1^{\text{TP}}, \dots, i_k^{\text{TP}})$  – время разгона в интервалах скоростей соответственно от 60 до 120 км/ч;  $G_{10}(i_1^{\text{TP}}, \dots, i_k^{\text{TP}})$  – время разгона с места с переключением передач на заданном мерном участке пути разгона 1000 м;  $G_{11}(i_1^{\text{TP}})$  – максимальный преодолеваемый подъем. Вторая группа:  $Q_1(i_1^{\text{TP}}, \dots, i_5^{\text{TP}})$ ,  $Q_2(i_1^{\text{TP}}, \dots, i_5^{\text{TP}})$  – расходы топлива соответственно в городском и магистральном ездовом цикле;  $Q_6(i_k^{\text{TP}})$ ,  $Q_7(i_{k-1}^{\text{TP}})$  – рас-

ходы топлива при установившейся скорости движения машины 90 км/ч соответственно на пятой и четвертой передаче ( $k$  – число ступеней трансмиссии);  $Q_8(i_k^{TP})$ ,  $Q_9(i_{k-1}^{TP})$  – то же самое, что критерии  $Q_6(i_k^{TP})$ ,  $Q_7(i_{k-1}^{TP})$ , но для скорости движения автомобиля 120 км/ч.

Обработка результатов экспертных опросов позволила определить значения весовых коэффициентов важности частных критериев и построить два групповых критерия в виде:

$$K_1(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) = 18,02 G_{16}(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) / G_{16}^* + 18,23 G_1(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) / G_1^* + \\ + 17,89 G_4(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) / G_4^* + 12,73 G_{10}(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) / G_{10}^* + \\ + 16,02 G_8(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) / G_8^* + 17,10 G_{11}(i_1^{TP}) / G_{11}^*; \\ K_2(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) = 19,90 Q_1(i_1^{TP}, \dots, i_5^{TP}) / Q_1^* + \\ + 17,87 Q_2(i_1^{TP}, \dots, i_5^{TP}) / Q_2^* + 15,57 Q_7(i_{k-1}^{TP}) / Q_7^* + \\ + 14,0 Q_9(i_{k-1}^{TP}) / Q_9^* + 16,31 Q_6(i_k^{TP}) / Q_6^* + 16,35 Q_8(i_k^{TP}) / Q_8^*.$$

При этом  $G_1^* = 6,597$  с,  $G_4^* = 16,067$  с,  $G_8^* = 18,08$  с,  $G_{10}^* = 37,207$  с,  $G_{11}^* = 43,52$  %,  $G_{16}^* = 43,839$  м/с,  $Q_1^* = 7,481$  л,  $Q_2^* = 6,529$  л,  $Q_6^* = 6,701$  л,  $Q_7^* = 6,467$  л,  $Q_8^* = 6,137$  л и  $Q_9^* = 8,502$  л, используемые для нормирования частных критериев при построении групповых критериев, определялись расчетным путем для автомобиля ИЖ-2126, оборудованного серийной трансмиссией с неоптимальными передаточными числами.

В третьем экспертном опросе каждый эксперт оценивал в 10-балльной системе важность топливной экономичности и тягово-скоростных свойств, т.е. важность групповых критериев  $K_1(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP})$  и  $K_2(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP})$  для легковых автомобилей. В соответствии с результатами обработки третьего экспертного опроса обобщенный критерий оптимальности передаточных чисел трансмиссии легкового автомобиля

$$K_{1,2}(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) = 46,773 K_1(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}) + 53,227 K_2(i_1^{TP}, \dots, i_k^{TP}). \quad (3)$$

При оптимизации передаточных чисел трансмиссии проектируемой машины необходимо провести анализ всех требований, предъявляемых к ее эксплуатационным свойствам. Оптимальные передаточ-

ные числа трансмиссии должны по возможности обеспечить выполнение этих требований или по крайней мере реализовать наилучшие возможные показатели таких эксплуатационных свойств, как топливная экономичность и тягово-скоростные свойства.

Согласно анализу опубликованных исследований, проведенных в ряде автомобильных фирм мира, легковой автомобиль такого класса, как ИЖ-2126, обладает приемлемыми динамическими качествами при следующих критериальных ограничениях:

$$\begin{cases} G_4(i_1^{tp}, i_2^{tp}, i_3^{tp}) \leq 17 \text{ с}, & G_8(i_1^{tp}, i_2^{tp}, i_3^{tp}, i_4^{tp}) \leq 25 \text{ с}, \\ G_{10}(i_1^{tp}, i_2^{tp}, i_3^{tp}, i_4^{tp}) \leq 42 \text{ с}, & G_{11}(i_1^{tp}) \geq 36 \%, \\ G_{16}(i_4^{tp}) \geq 150 \text{ км/ч}, & G_{15}(i_5^{tp}) \geq 3 \%. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, задача расчета оптимальных передаточных чисел трансмиссии указанного автомобиля формулируется следующим образом: определить ряд передаточных чисел трансмиссии, который обеспечивает минимум обобщенному критерию оптимальности (3) при критериальных ограничениях (4).

Решение данной задачи оптимизации передаточных чисел трансмиссии автомобиля ИЖ-2126 позволило определить оптимальные передаточные числа 5-ступенчатой трансмиссии. Значения передаточных чисел, обеспечивающих минимальное значение обобщенного критерия оптимальности (3) с учетом введенных критериальных ограничений (4): 10,659; 6,9691; 4,6813; 3,4323; 2,6885.

Разработанная методика оптимизации, реализованная в виде пакета прикладных программ, позволяет формулировать и решать различные задачи по определению оптимальных показателей топливной экономичности и тягово-скоростных свойств проектируемой машины. При этом практически без дополнительных материальных затрат в сфере производства удается существенно улучшить эксплуатационные свойства машин за счет реализации в их конструкциях оптимальных параметров – передаточных чисел трансмиссии.

### Список литературы

1. Кондрашкин А.С., Умняшкин В.А., Филькин Н.М. Методика расчета передаточных чисел трансмиссии легкового автомобиля // Автомобильная промышленность. – 1986. – № 2. – С. 16–17.

2. Филькин Н.М. Оптимизация параметров конструкции энерго-силовой установки транспортной машины: дис. ... д-ра техн. наук / ИжГТУ. – Ижевск, 2001. – 430 с.

3. Умняшкин В.А., Филькин Н.М., Галиев Р.М. Особенности расчета передаточных чисел и количества ступеней трансмиссии легкового автомобиля, оборудованного комбинированной энергетической установкой // Вестник Уральского межрегионального отделения Российской академии транспорта. – Курган, 2001. – № 3–4. – С. 103–106.

### References

1. Kondrashkin A.S., Umniaskin V.A., Fil'kin N.M. Metodika rascheta peredatochnykh chisel transmissii legkovogo avtomobilia [The method of calculation of the gear ratio of the transmission cars]. *Avtomobil'naia promyshlennost'*, 1986, no. 2, pp. 16-17.

2. Fil'kin N.M. Optimizatsiia parametrov konstruktsii energosilovoi ustanovki transportnoi mashiny [Optimization of design parameters power plants transport machines]. Thesis of Doctor's degree dissertation, Izhevsk, 2001, 430 p.

3. Umniashkin V.A., Fil'kin N.M., Galiev R.M. Osobennosti rascheta peredatochnykh chisel i kolichestva stupenei transmissii legkovogo avtomobilia, oborudovannogo kombinirovannoi energeticheskoi ustanovkoi [Features of calculation of the gear ratio and number of stages of transmission for a passenger car equipped with a combination power plant]. *Vestnik Ural'skogo mezhhregional'nogo otdeleniia Rossiiskoi akademii transporta*. Kurgan, 2001, no. 3-4, pp. 103-106.

Получено 13.11.2014

### Об авторе

**Филькин Николай Михайлович** (Ижевск, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и металлообрабатывающее оборудование» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова, заслуженный деятель науки Удмуртской Республики, академик Академии транспорта России, член-корреспондент Академии естествознания России, действительный член УО Российской инженерной академии (426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, e-mail: fnm@istu.ru).



### **About the author**

**Fil'kin Nikolai Mikhailovich** (Izhevsk, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automobiles and Metal Working Machinery, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences, Member of the Russian Engineering Academy (7, Studencheskaia st., Izhevsk, Udmurt Republic, 426069, Russian Federation, e-mail: [fnm@istu.ru](mailto:fnm@istu.ru)).