

УДК 656.13:625.7

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ

Г.Г. Птица, аспирант, ХНАДУ

*Аннотация.* Изложены этапы проведения теоретических исследований усовершенствования метода оценки безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах. Особое внимание уделено формализации объекта исследования и методикам определения однородности и взаимодействия показателей безопасности.

*Ключевые слова:* дорожно-транспортная ситуация, безопасность дорожного движения, частный коэффициент аварийности, кластерный анализ, факторный анализ.

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕКИ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ

Г.Г. Птиця, аспірант, ХНАДУ

*Анотація.* Викладено етапи проведення теоретичних досліджень удосконалення методу оцінки безпеки дорожнього руху на автомобільних дорогах. Особливу увагу приділено формалізації об'єкта дослідження і методикам визначення однорідності та взаємодії показників безпеки.

*Ключові слова:* дорожньо-транспортна ситуація, безпека дорожнього руху, частковий коефіцієнт аварійності, кластерний аналіз, факторний аналіз.

## THEORETICAL RESEARCHES OF ROAD SAFETY PARAMETERS ON HIGHWAYS

G. Ptitsa, postgraduate, KhNAHU

*Abstract.* The stages of theoretical research to improve the method assessment of road safety on highways are described. Particular attention is paid to the formalization of the object of research and methods of determining the similarity and the interaction of safety indexes.

*Key words:* traffic accident, traffic safety, particular accident rate, cluster analysis, factor analysis.

### Введение

Дорожно-транспортные происшествия наносят экономике Украины значительный ущерб. По данным Всемирной организации здоровья и Всемирного банка, потери украинской экономики от ДТП достигают 5 млрд долл. США в год, что составляет 3,6 % валового внутреннего продукта страны. Причем львиная доля ущерба приходится на затраты, связанные с гибелью или ранением людей в результате ДТП. В целом за 20 лет независимости в результате ДТП на дорогах Украины погибло более 137 тыс. человек и 1 млн по-

лучили тяжелые телесные повреждения, 500 тыс. остались инвалидами.

Проблему повышения уровня безопасности дорожного движения необходимо решать, в первую очередь, путем усовершенствования методов оценки и анализа аварийности на автомобильных дорогах, так как именно этому вопросу уделяется особое внимание в «Державній цільовій програмі підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2016 року».



частного коэффициента аварийности ( $k = \overline{1, N}; i = \overline{1, n}$ );  $N$  – количество признаков классификации частных коэффициентов аварийности.

### Определение однородности и взаимодействия показателей безопасности

При проведении кластеризации были определены признаки частных коэффициентов аварийности [3]. При этом целевую функцию кластеризации предложено формировать с учетом степени влияния частных коэффициентов аварийности на уровень безопасности дорожного движения, который описывается количественными показателями:  $x_{i1}$  – минимальная степень влияния частного коэффициента аварийности на безопасность дорожного движения (БДД);  $x_{i2}$  – максимальная степень влияния частного коэффициента аварийности на БДД;  $x_{i3}$  – арифметическое среднее диапазона изменения степени влияния частного коэффициента аварийности на БДД. Этапы выполнения кластеризации [3] представлены на рис. 1.

Первые два этапа формализованы и описаны [3]. Третий этап необходим для приведения исходных значений классификационных признаков в безразмерные величины и позволяет уменьшить различие между классами по тем классификационным признакам, по которым наилучшим образом обнаруживались групповые различия. Нормированные значения имеют нулевое среднее значение и единичную дисперсию. На четвертом этапе

проводится выбор меры расстояния для признаков классификации. Расстоянием (метрикой) между частными коэффициентами аварийности в пространстве выбирается такая величина  $d_{iq}$ , которая удовлетворяет аксиомам положительности, симметричности, неравенства треугольника

$$\begin{cases} 1) d_{iq} > 0; d_{iq} = 0; \\ 2) d_{iq} = d_{qi}; \\ 3) d_{iq} + d_{qg} \geq d_{ig}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $d_{iq}, d_{qi}, d_{qg}, d_{ig}$  – расстояние между частными коэффициентами аварийности;  $i$  –  $i$ -й частный коэффициент аварийности;  $q, g$  –  $q$ -й  $g$ -й частный коэффициент аварийности, отличный от  $i$ -го.

Из множества методов определения меры расстояния выбрано евклидово расстояние [3] как мера, точно отображающая геометрическое положение частных коэффициентов в пространстве и определяемая зависимостью

$$d_{iq} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{ik} - x_{qk})^2}, \quad (6)$$

где  $k$  –  $k$ -й классификационный признак  $i$ -го,  $q$ -го частного коэффициента аварийности;  $x_{ik}, x_{qk}$  – значение признаков классификации.



Рис. 1. Этапы кластеризации частных коэффициентов аварийности

Расстояния между парами частных коэффициентов аварийности описаны симметричной матрицей расстояний вида

$$D = \begin{pmatrix} 0, & d_{12}, \dots, d_{1q}, \dots, d_{1n} \\ d_{21}, & 0, \dots, d_{2q}, \dots, d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{i1}, & d_{i2}, \dots, d_{iq}, \dots, d_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1}, & d_{n2}, \dots, d_{nq}, \dots, 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

На пятом этапе классификации применили иерархический метод Варда [3], так как элементы совокупности (частные коэффициенты аварийности) по признакам классификации являются близко расположенными объектами. Данный метод позволяет формировать отдельные друг от друга шаровидные кластеры с наименьшим внутрикласовым среднеквадратическим отклонением, потому что метод обеспечивает минимизацию внутрикласовой дисперсии на каждом шаге классификации. Это означает, что оптимизация проводится на каждом шаге, а не в конце разбиения, что является преимуществом данного метода. Тогда целевая функция может быть представлена как

$$W_c = \min \left( \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_{kc})^2 \right), \quad (8)$$

где  $c$  – номер кластера;  $k$  – признак, характеризующий каждый элемент ( $k = \overline{1, N}$ );  $n_c$  – количество элементов в  $c$ -м кластере;  $i$  –  $i$ -й элемент в кластере ( $i = \overline{1, n_c}$ );  $x_{ik}$  – значе-

ние  $k$ -го классификационного признака  $i$ -го частного коэффициента аварийности в кластере;  $\bar{x}_{kc}$  – среднее значение  $k$ -го признака в  $c$ -м кластере.

Результатом проведения каждого шага является объединение таких двух кластеров, которые приводят к минимальному увеличению целевой функции. При этом на первом шаге классификации методом Варда считается, что каждый частный коэффициент аварийности является отдельным кластером, а на последнем шаге – все частные коэффициенты аварийности объединяются в один кластер. Процедура классификации состоит из  $n-1$  шагов, и в результате строится дендограмма последовательной группировки частных коэффициентов аварийности в кластеры, на которой указываются все элементы совокупности ( $K_i$ ) и мера сходства, при которой происходит объединение. Для анализа корректности иерархической классификации на шестом этапе применяется итерационный метод « $k$ -средних», поскольку результаты, полученные данным методом в кластерном анализе, принято считать устойчивыми. Порядок проведения классификации методом « $k$ -средних» приведен на рис. 2.

Особенностью данного метода является то, что процесс классификации начинается с задания итогового количества кластеров. Так как результаты классификации методом Варда не дают возможности точного определения количества кластеров, то кластеризацию методом « $k$ -средних» целесообразно проводить для различного количества кластеров.

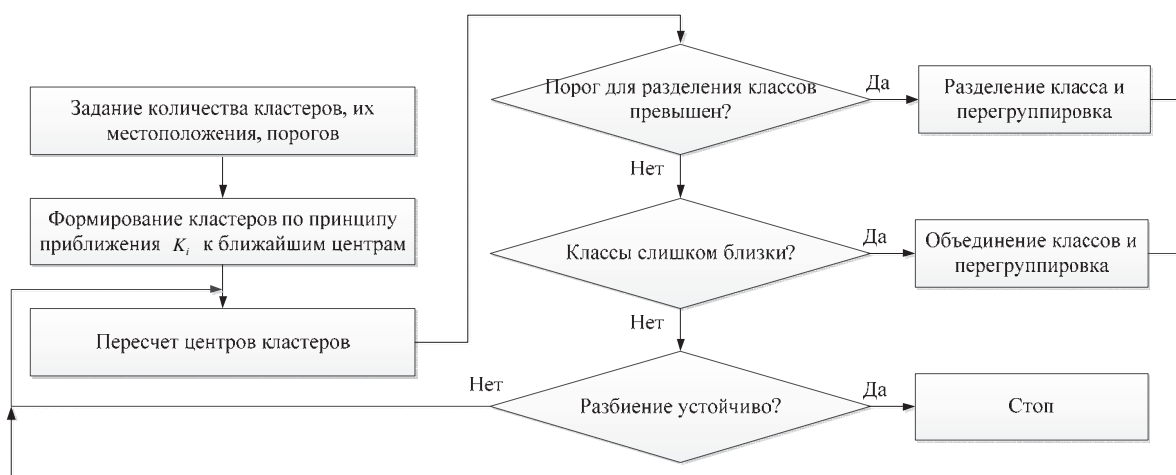


Рис. 2. Порядок классификации методом « $k$ -средних»

Возможное количество кластеров определяется по дендограмме, на которой выбирается диапазон изменения количества кластеров по принципу наглядности классификации. Седьмой этап кластеризации позволяет осуществить проверку качества результатов кластерного объединения. Анализ критериев качества классификации частных коэффициентов аварийности позволил выделить основные критерии определения наилучшего разбиения. При этом наилучшим разбиением считается совокупность кластеров, у которых среднее расстояние между центрами кластеров наибольшее, т.е. геометрическое положение центров кластеров в пространстве максимально удалено друг от друга. В результате выполнения алгоритма кластеризации определено, что среди общей совокупности частных коэффициентов аварийности ( $K_i$ ), существует устойчивая совокупность групп  $K_i$  по признаку степени влияния параметров дорожных условий на уровень безопасности дорожного движения.

Для решения задачи усовершенствования метода оценки безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах необходимым является определение взаимосвязи показателей безопасности и определение скрытых причин, объясняющих данную взаимосвязь. Для повышения безопасности движения целесообразно применить методы факторного анализа, которые позволяют на основании реально существующей связи выявлять скрытые факторы, описывающие исследуемую ситуацию с одновременным стремлением минимизировать число этих факторов. Дорожно-транспортную ситуацию  $A_j$ , представленную в виде (3), с помощью

методов факторного анализа можно представить через латентные факторы  $F_f$

$$A_j = (F_1, F_2, \dots, F_f, \dots, F_p), \quad (9)$$

при этом количество латентных факторов  $p$  будет намного меньше количества частных коэффициентов аварийности  $n$  ( $p \ll n$ ). Переход от частных коэффициентов аварийности к латентным факторам осуществляется посредством выявления линейной зависимости между  $F_f$  и  $K_i$

$$K_i = \sum_{f=1}^p a_{if} \cdot F_{fi}, \quad (10)$$

$$F_f = \frac{\sum_{i=1}^n a_{if} \cdot K_{if}}{\lambda_f}, \quad (11)$$

где  $A_j$  –  $j$ -я дорожно-транспортная ситуация ( $j = \overline{1, m}$ );  $K_i$  –  $i$ -й частный коэффициент аварийности ( $i = \overline{1, n}$ );  $a_{if}$  – факторная нагрузка фактора  $f$  для  $i$ -го частного коэффициента аварийности ( $f = \overline{1, p}$ );  $F_{fi}$  –  $f$ -я главная компонента  $i$ -го частного коэффициента аварийности;  $\lambda_f$  – собственное значение  $f$ -го фактора, которое определяется описываемой данным фактором дисперсией частных коэффициентов аварийности.

В работе [4] определены этапы проведения редукции частных коэффициентов аварийности методом главных компонент (рис. 3).

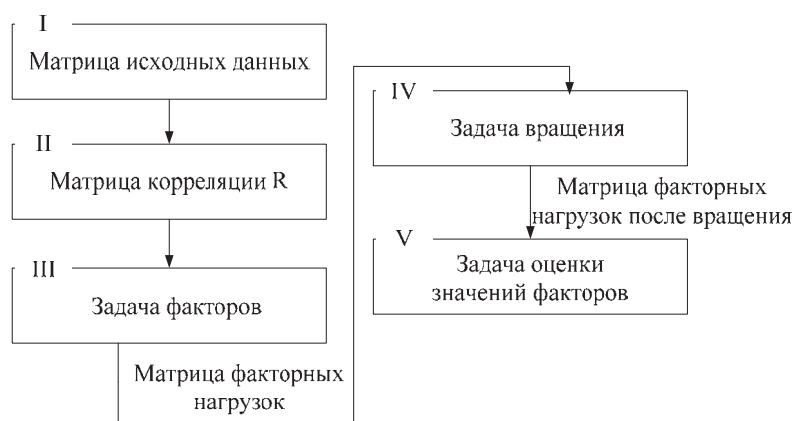


Рис. 3. Этапы проведения редукции частных коэффициентов аварийности

Исходные данные формируются на основе экспериментальных исследований влияния дорожных условий на безопасность дорожного движения и представляются в виде (3). Для выполнения редукции необходимым является нормирование и центрирование исходной совокупности частных коэффициентов аварийности с помощью преобразования

$$K_{ij}^H = (K_{ij}^{исх.} - \bar{K}_i) / \sigma_i, \quad (12)$$

где  $K_{ij}^{исх.}$  – исходное значение  $i$ -го частного коэффициента аварийности в  $j$ -й дорожно-транспортной ситуации;  $\bar{K}_i$  – среднее значение  $i$ -го частного коэффициента аварийности для всей совокупности рассмотренных дорожно-транспортных ситуаций;  $\sigma_i$  – стандартное отклонение  $i$ -го частного коэффициента аварийности.

Метод главных компонент позволяет формировать совокупность латентных ортогональных факторов ( $F_f$ ), объясняющих всю дисперсию исходной совокупности частных коэффициентов аварийности ( $K_i$ ), не затрагивая геометрической структуры их взаимного расположения. Дисперсия частных коэффициентов аварийности характеризуется ковариационной матрицей  $\Sigma$ , где  $i, q$  – номера частных коэффициентов аварийности ( $i = \overline{1, n}; q = \overline{1, n}$ ). Элементы этой матрицы определяются выражением

$$S_{iq} = r_{iq} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_q. \quad (13)$$

При  $i = q$  выражение (13) представляет дисперсию  $i$ -го или  $q$ -го признака, т.к. при этом  $r_{iq} = 1$ .

$$\Sigma = \begin{pmatrix} S_{11}, S_{12}, \dots, S_{1q}, \dots, S_{1n} \\ S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2q}, \dots, S_{2n} \\ \dots \\ S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{iq}, \dots, S_{in} \\ \dots \\ S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{nq}, \dots, S_{nn} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Однако процесс нормирования исходных значений частных коэффициентов аварийности позволяет преобразовывать ковариаци-

онную матрицу  $\Sigma$  в корреляционную матрицу  $R$ , т.к.  $\sigma_i^2 = \sigma_q^2 = 1$ .

$$R = \begin{pmatrix} 1, r_{12}, \dots, r_{1q}, \dots, r_{1n} \\ r_{21}, 1, \dots, r_{2q}, \dots, r_{2n} \\ \dots \\ r_{i1}, r_{i2}, \dots, 1, \dots, r_{in} \\ \dots \\ r_{n1}, r_{n2}, \dots, r_{nq}, \dots, 1 \end{pmatrix}, \quad (15)$$

где  $r_{iq}$  – коэффициент корреляции между частными коэффициентами аварийности.

После определения корреляционной матрицы проводится ее ортогональное преобразование, которое заключается в последовательном выделении новых факторов. Первая главная компонента  $F_1$  исследуемой системы частных коэффициентов аварийности ( $K_i$ ) определяется как центрировано-нормированная линейная комбинация  $K_i$ , которая среди прочих  $F_f$  имеет наиболее изменчивую дисперсию. В качестве каждой последующей  $f$ -й главной компоненты  $F_f$  ( $f = \overline{1, p}$ ) определяется такая центрировано-нормированная комбинация  $K_i$ , которая: 1) не коррелирована с предыдущими главными компонентами ( $f - 1$ ); 2) среди всех возможных комбинаций  $K_i$ , которые не коррелированы с предыдущими главными компонентами ( $f - 1$ ), имеет наибольшую дисперсию. Результатом преобразования является матрица факторных нагрузок  $a$ , которая описывается коэффициентами парной корреляции ( $r_{K_i F_f}$ ) между  $K_i$  и  $F_f$ ,

$$a_{if} = r_{K_i F_f}$$

$$a = \begin{pmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1f}, \dots, a_{1p} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2f}, \dots, a_{2p} \\ \dots \\ a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{if}, \dots, a_{ip} \\ \dots \\ a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nf}, \dots, a_{np} \end{pmatrix}, \quad (16)$$

где  $a_{if}$  – факторная нагрузка  $i$ -го частного коэффициента аварийности на  $f$ -й фактор.

На основании данной матрицы определяются собственные значения факторов  $\lambda_f$  зависимостью

$$\lambda_f = \sum_{i=1}^n a_{if}^2. \quad (17)$$

Согласно условию выделения латентных факторов ( $p \ll n$ ) в работе [4] выявлены критерии определения достаточного количества  $p$  факторов – это критерии Кайзера и Кеттеля. Четвертый этап редукции необходим для поиска «простой структуры» или возможности заменить большое число переменных меньшим числом факторов. При формализации поиска «простой структуры» получили для каждого  $K_i$  максимальное количество больших  $\lambda_f$  по одним  $F_f$  и, одновременно, наибольшее количество минимальных  $\lambda_f$  по другим  $F_f$ . В работе [3] обосновано применение метода вращения «Варимакс» для поиска «простой структуры» латентных факторов  $F_f$ , объясняющих дисперсию  $K_i$ . В результате вращения определяются итоговые собственные значения  $\lambda_f$  факторов  $F_f$  и соответствующие им факторные нагрузки  $a_{if}$ .

### Выводы

В результате проведенного исследования можно сделать вывод: формализация выявления взаимодействия частных коэффициентов аварийности, с применением методов многомерного статистического анализа, дала возможность представить состояние дорожного движения через латентные факторы  $F_f$  ( $f = \overline{1, p}$ ), которые определяются на основании значений частных коэффициентов аварийности  $K_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) при условии, что  $p \ll n$ . Это позволяет сократить количество исследуемых параметров для оценки безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах без потери точности и, соответственно, повышает эффективность практического применения метода определения итогового коэффициента аварийности. В результате проведенного эксперимента для II категории дорог получены семь латентных

факторов, которые описывают 80 % дисперсии 16 частных коэффициентов аварийности. При этом адекватность полученной модели вида (9), по сравнению с моделью (3), подтверждается ошибкой аппроксимации, равной 3 %.

### Литература

1. Абрамова Л.С. Классификация методов определения показателей безопасности дорожного движения на автомобильных дорогах / Л.С. Абрамова, Г.Г. Птица // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы международной научно-практической конференции. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2013. – Т. 2 – С. 10–16.
2. Бабков В.Ф. Дорожные условия и безопасность движения: учебник для вузов / В.Ф. Бабков. – М.: Транспорт, 1993. – 272 с.
3. Абрамова Л.С. Метод классификации частных коэффициентов аварийности для автомобильных дорог различных технических категорий / Л.С. Абрамова, Г.Г. Птица // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: зб. наук. праць. – 2012. – Вип. №44 (950). – С. 41–55.
4. Абрамова Л.С. Выявление латентных факторов частных коэффициентов аварийности / Л.С. Абрамова, Г.Г. Птица // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Вып. 5/4. – С. 32–37.
5. Абрамова Л.С. Подход к усовершенствованию оценки уровня безопасности дорожного движения / Л.С. Абрамова, Г.Г. Птица // Безпека дорожнього руху: правові та організаційні аспекти: матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції. – Донецьк: Видавництво «ЛАНДОН-XXI», 2012. – С. 168–172.

Рецензент: В.П. Волков, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2013 г.