

УДК 630.383

Профессор А.В. Скрыпников, докторант С.В. Дорохин,
аспирант А.Г. Чистяков, ассистент Е.В. Глазкова
(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра информационных систем, моделирования и
управления. тел. 89103434840
E-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru

Professor A.V. Skrypnikov, doctoral S.V. Dorokhin,
graduate Chistiakov A.G., assistant E.V. Glazkova
(Voronezh state university of engineering technologies) Department of information systems,
modeling and control. phone. 89103434840
E-mail: skrypnikovvsafe@mail.ru

Алгоритм статистической обработки результатов измерений участков лесных автомобильных дорог с помощью контрольно-измерительного комплекса

Algorithm of statistical processing of measurement results areas of forest roads using test-measuring system

Реферат. Проведение метрологических испытаний информационно-измерительного комплекса дорожной лаборатории с целью автоматизации данных о геометрии дороги требует разработки теоретических основ и методики их выполнения. В качестве основного метода исследования точности принят метод сравнения результатов, полученных с его помощью, с аналогичными результатами, полученными на основе геодезических измерений. При этом геодезические данные приняты за основные, поскольку они обладают наиболее высокой точностью. Разработан алгоритм статистической обработки результатов измерений участков лесных автомобильных дорог с помощью контрольно-измерительного комплекса. В статье представлен алгоритм определения геометрических величин дороги на примере двух: угол поворота, длина круговой кривой. Авторами разработана формула, позволяющая оценивать точность измерения углов поворота оси дороги на закруглениях с помощью дорожной лаборатории с учетом изменения погрешности в зависимости от осреднения результатов (количества челночных проездов) и определять оптимальное число проездов. Также в статье предложена формула, позволяющая оценивать точность определения длины кривой закругления с помощью дорожной лаборатории. Погрешность при измерении длины кривой предлагается определять погрешностями положения точек начала закругления и конца закругления. При проезде лаборатории «туда-обратно» по закруглению можно получить среднее значение длины кривой, которое будет точнее единичного определения этой длины для каждого проезда. Разработанная методика может быть применима для определения всех оставшихся геометрических величин дороги.

Summary. Realization of metrological testing information-measuring complex road laboratories to automate the geometry of the road requires the development of theoretical foundations and methods of their implementation. As the main research method adopted the method of comparing the accuracy of the results obtained with it, with similar results obtained based on survey. In this survey data taken in the main, because they have the highest accuracy. An algorithm for statistical processing of measurement results areas of forest roads using test-measuring system. The paper presents an algorithm for determining the geometric variables on the example of two roads: the angle of rotation, the length of the curve. The authors have developed a formula that allows to assess the accuracy of measurement of the angles of rotation axis of the road on the road with the help of rounded to reflect changes in laboratory error depending on averaging the results (number of shuttle drives) and to determine the optimal number of driveways. Also in the article formula is proposed to evaluate the accuracy of determining the length of the curve curvature using road laboratory. Error in measuring the length of a curve is proposed to determine the position errors start and end points of curvature. When traveling laboratory "round-trip" by rounding can obtain an average length of a curve to be more precise definition of this unit of length for each passage. The method developed can be applied to determine all the remaining geometric variables of the road.

Ключевые слова: алгоритм, контрольно-измерительный комплекс, дорога, точность, погрешность.

Keywords: algorithm, control and measurement system, road, accuracy, measurement error.

Проведение метрологических испытаний информационно-измерительного комплекса дорожной лаборатории требует разработки теоретических основ и методики их выполнения.

В качестве основного метода исследования точности принят метод сравнения результатов, полученных с его помощью, с аналогичными

ми результатами, полученными на основе геодезических измерений. При этом геодезические данные приняты за основные, поскольку они обладают наиболее высокой точностью.

© Скрыпников А.В., Дорохин С.В.,
Чистяков А.Г., Глазкова Е.В., 2014

Алгоритм статистической обработки результатов измерений участков лесных автомобильных дорог с помощью контрольно-измерительного комплекса представлен ниже.

1. Вычисляют среднее значение угла поворота α_{cp} :

$$\alpha_{cp} = \frac{\sum_{li}^n \alpha_{li}}{n} \quad (1)$$

2. Вычисляют среднюю квадратическую погрешность одного определения $\alpha_{ли}$:

$$m_{\alpha_{ли}} = \pm \sqrt{\frac{n}{n-1} \left(\frac{\sum_{li}^n \alpha_{li}^2}{n} - \alpha_{cp}^2 \right)}, \quad (2)$$

и среднего значения α_{cp} :

$$m_{\alpha_{cp}} = \frac{m_{\alpha_{ли}}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

3. Строят доверительные интервалы для истинного угла поворота $\alpha_{ист}$ по результатам одного i -го проезда лаборатория и по осредненным данным на n проездов:

$$\alpha_i - t m_{\alpha} \leq \alpha_{ист} \leq \alpha_{и} + t m_{\alpha}, \quad (4)$$

$$\alpha_{cp} - t m_{\alpha_{cp}} \leq \alpha_{ист} \leq \alpha_{сз} + t \alpha_{cp}, \quad (5)$$

где t - квантиль нормированного нормального распределения, соответствующий принятой вероятности $\Phi(t)$.

4. Все результаты разделяют на четные и нечетные и вычисляют все статистики отдельно по четным и нечетным значениям. Аналогично необходимо образовать выборки из 1,4,7,10,..., затем из 2,5,8,11,... и 3,6,9,12,..., значения $\alpha_{ли}$ (то есть отобрать из всех значений каждый третий результат, начиная с первого, затем со второго и затем с третьего) и повторить трижды вычисления всех статистик по 1/3 всех проездов. Аналогичным образом необходимо образовать 4 выборки численностью $n/4$ и вновь повторить все вычисления.

Результаты всех вычислений можно представить на графиках. Если на графике провести горизонтальную прямую на уровне $m_{\alpha_{cp}} = m_{дон}$ ($m_{дон}$ - допустимое значение погрешности $m_{\alpha_{cp}}$), то на оси абсцисс можно получить значение n , которое обеспечивает определение α_{cp} с допустимой погрешностью. Величина n определяет необходимое число челночных проездов дорожной лабора-

тории по закруглению, по данным которых определяют среднее значение угла поворота α_{cp} с погрешностью, не более $m_{дон}$.

Соотношения (2-5) позволяют оценить точность определения угла поворота, однако они же являются полным и окончательным решением задачи.

4. Для сравнения углов поворота, полученных с помощью дорожной лаборатории ($\alpha_{л}$), и на основе геодезических измерений ($\alpha_{г}$), на закруглении необходимо определить точки начало закругления (НЗ) и конец закругления (КЗ). Погрешности разбивки оси дороги на закруглении связаны с тем, что плавная круговая кривая заменяется хордами длиной $S=10, 15, 20$ м. Середины хорд отклоняются от круговой кривой на величину «стрелы»

$f = \frac{S}{8R}$, которая проявляет себя как погрешность разбивочных работ.

Допускаемые проектные отклонения от проектных размеров ширины покрытия равны: для асфальтобетонных покрытий ± 10 см и для цементобетонных ± 5 см.

Погрешности положения кромки, связанные с её загрязнением и разрушением при эксплуатации, оцениваются величиной от 2-3 до 20-25 см [1-2]. В среднем она, по-видимому, не превышает 10-11 см.

Таким образом, суммарная величина случайного отклонения кромки покрытия от круговой кривой будет равна:

$$l_{сумм} = \pm \sqrt{6,5^2 + 8^2 + 11^2} = \pm 14 \text{ см.}$$

Если погрешность $l_{сум} = \pm 14$ см считать предельной, то средняя (квадратическая) будет равна $l \approx \pm 7$ см.

5. Погрешность угла поворота, измеренного с помощью дорожной лаборатории, можно охарактеризовать разностью:

$$\Delta\alpha = \alpha_{л} - \alpha_{г}, \quad (6)$$

где $\alpha_{л}$ и $\alpha_{г}$ - значения угла поворота, полученные лабораторией и геодезическим методом.

Вместе с тем, разность $\Delta\alpha$ есть результат действия случайных погрешностей при измерениях $\alpha_{л}$ и $\alpha_{г}$, то есть:

$$\Delta\alpha = \pm \sqrt{m_{\alpha_{л}}^2 + m_{\alpha_{г}}^2}, \quad (7)$$

Откуда погрешность измерения угла поворота с помощью дорожной лаборатории будет равна:

$$m_{\alpha_{л}} = \pm \sqrt{\Delta\alpha^2 - m_{\alpha_{г}}^2} \quad (8)$$

Погрешность измерения угла α теодолитом очень мало зависит от инструментальной погрешности и почти полностью определяется влиянием погрешностей положения точек НЗ и КЗ, а также отклонениями кромки покрытия на закруглении от идеальной круговой кривой. При этом отклонения кромки от указанной кривой влияют на точность измерения угла α также, как погрешность центрирования теодолита и наблюдаемых точек (сигналов).

Влияние погрешностей центрирования теодолита и сигналов на точность измерения угла β выражается формулой:

$$m_{\beta_{\text{ц}}} = \pm \frac{\rho}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{l_c}{b_1}\right)^2 + \left(\frac{l_c}{b_2}\right)^2 + \frac{l_1^2}{b_1^2 \cdot b_2^2} \times (b_1^2 + b_2^2 - 2b_1b_2 \cos \beta)}, \quad (9)$$

где l_c , l_e - погрешности центрирования сигналов и теодолита; b_1 , b_2 - длины сторон, образующих угол β .

Если $l_c = l_e = l$, $b_1 = b_2 = b$ и $\beta \leq 15^\circ$, то $m_{\beta_{\text{ц}}} = \rho l / b$.

Так как $\alpha = 2\varphi$, то погрешность измерения угла α , обусловленная отклонением кромки покрытия от круговой кривой, будет равна:

$$m_{\alpha_1} = \pm 2\rho l / b \quad (10)$$

6. Рассмотрим влияние погрешностей определения положения точек НЗ и КЗ на кривой закругления на точность измерения угла α . Как показано в работе [3], влияние указанных погрешностей на точность измерения угла φ определяется формулой:

$$m_{\varphi} = \pm \sqrt{\frac{dl}{Ra}}, \quad (11)$$

где m_{φ} - погрешность измерения угла φ , обусловленная погрешностями положения точек НЗ и КЗ на закруглении; $\rho = 3438$ - радиан в минутах; l - предельное отклонение кромки покрытия от круговой кривой с вероятностью 0,68; d, a - расстояния; R - радиус круговой кривой.

Так как $\alpha = 2\varphi$, то:

$$m_{\alpha_1} = \pm 2\rho \sqrt{\frac{2l}{Ra}} \quad (12)$$

Суммарное влияние погрешностей m_{α_1} и m_{α_2} на точность измерения угла α будет равно:

$$m_{\alpha_2}^2 = 4\rho^2 l^2 \left(\frac{1}{b^2} + \frac{d}{Ral} \right) \quad (13)$$

Подставляя значение m_{α_2} в (12), получим:

$$m_{\alpha_1} = \pm \sqrt{\Delta\alpha^2 - 4\rho^2 l^2 \times \left(\frac{1}{b^2} + \frac{d}{Ral} \right)}, \quad (14)$$

где $\Delta\alpha = \alpha_{\text{л}} - \alpha_{\text{г}}$ - разность значений угла поворота оси дороги, измеренных дорожной лабораторией и теодолитом; остальные обозначения прежние.

Формула (14) является окончательной рабочей. Она позволяет оценивать точность измерения углов поворота α оси дороги на закруглениях с помощью дорожной лаборатории. При этом разность $\Delta\alpha = \alpha_{\text{л}} - \alpha_{\text{г}}$ можно вычислять по значениям $\alpha_{\text{л}}$, полученным из одного, двух, трёх, четырёх и т.п. проездов лаборатории. Таким путём можно проследить, как изменяется погрешность m_{α_1} в зависимости от осреднения результатов (количества челночных проездов) и определять оптимальное число проездов.

Анализ данных, полученных по формуле (14), необходимо проводить совместно с анализом данных, полученных по формулам (2), (3), (4) и (5).

Важно ещё раз подчеркнуть, что изложенные выше теоретические основы метрологических испытаний лаборатории применимы только на круговой кривой.

7. Измеряют длину кривой закругления с помощью дорожной лаборатории. Погрешность измерения длины кривой с помощью дорожной лаборатории можно охарактеризовать разностью:

$$\Delta K = K_{\text{л}} - K_{\text{г}}, \quad (15)$$

где $K_{\text{л}}$ и $K_{\text{г}}$ - длина кривой, измеренная с помощью лаборатории и геодезическим методом.

Одновременно разность ΔK равна:

$$\Delta K = \pm \sqrt{m_{K_{\text{л}}}^2 + m_{K_{\text{г}}}^2} \quad (16)$$

В работах [3-4] показано, что погрешность измерения длины кривой, обусловленная неточным определением положения точек НЗ и КЗ, равна:

$$m_{K_{\text{г}}} = \sqrt{\frac{Rdl}{a}}, \quad (17)$$

где R - радиус круговой кривой; d, a - расстояния; l - предельное отклонение кромки покрытия от круговой кривой с вероятностью $\sim 0,68$.

Из формулы (17) видно, что для уменьшения погрешности измерения длины кривой точку N при определении начала и конца закругления следует выбирать как можно ближе к началу закругления, а расстояние $MN = a$ достаточно большим, чтобы отношение $\frac{d}{a}$ мало отличалось от единицы. Эта рекомендация была уже сформулирована раньше без специального доказательства. Указанное, естественно, относится и к выбору точек M, N в конце закругления.

Тогда из (17) получим:

$$m_{K_{\lambda}} = \pm \sqrt{\Delta K - \frac{Rdl}{d}} \quad (18)$$

Формула (18) является рабочей и позволяет оценивать точность определения длины кривой закругления с помощью дорожной лаборатории. Погрешность при измерении длины кривой с помощью дорожной лаборатории в основном определяется погрешностями положения точек НЗ и КЗ на закруглении. При проездах лаборатории «туда-обратно» по закруглению можно получить среднее значение длины кривой, которое будет в $\sqrt{n}$ раз точнее единичного определения этой длины для каждого проезда.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Скрыпников А.В. Построение процедур выбора управленческих решений на основе оптимизационных моделей // Вопросы современной науки и практики. 2009. № 10(24). С. 217-221.
- 2 Скрыпников А.В. Разработка теоретических основ и методов управления лесовозным автотранспортом // Бюллетень транспортной информации. 2009. № 9 (171). С. 25-27.
- 3 Скрыпников А.В. Теоретические основы и методы организации и управления дорожным движением // Бюллетень транспортной информации. 2010. № 1 (175). С.10-15.
- 4 Скрыпников А.В. Методы, модели и алгоритмы повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесных автомобильных дорог в процессе проектирования, строительства и эксплуатации. Монография. М.: ФЛИНТА: Наука, 2012. 310 с.
- 5 Скрыпников А.В., Скворцова Т.В., Кондрашова Е.В. Пропускная способность регулируемого перекрёстка // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: межвуз. сборник науч. тр. 2007. № 2. С.201-204.

Погрешность среднего значения кривой можно вычислить по формуле:

$$m_{K_{cp}} = \frac{m_K}{\sqrt{n}}, \quad (19)$$

где:

$$m_k = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - K_{cp})^2}{n-1}}, \quad (20)$$

$$K_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}.$$

С помощью формул (19), (20) можно построить доверительные интервалы для истинного значения длины кривой $K_{ист}$ по результатам одного и n проездов лаборатории по закруглению. С вероятностью 0,95 такие доверительные интервалы будут:

$$K_i - 1,96m_k \leq K_{ист} \leq K_i + 1,96m_k, \quad (21)$$

$$K_{cp} - 1,96m_{K_{cp}} \leq K_{ист} \leq K_{cp} + 1,96m_{K_{cp}}.$$

Отметим, что с вероятностью 0,95 должно выполняться неравенство:

$$|m_{K_{\lambda}}| \leq 1,96m_K, \quad (22)$$

где $m_{K_{\lambda}}$ и m_K вычисляются соответственно по (19)-(20). Это может служить контролем правильности наблюдения и вычисления.

REFERENCES

- 1 Skrypnikov A.V. Construction procedures for selecting management decisions based on optimization models. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki*. [Questions modern science and practice. University], 2009, no. 10 (24), pp. 217-221. (In Russ.).
- 2 Skrypnikov A.V. Develop a theoretical framework and management practices Timber trucks. *Bulleten' transportnoi informatsii*. [Bulletin of transport information], 2009, no. 9 (171), pp. 25-27. (In Russ.).
- 3 Skrypnikov A.V. Theoretical bases and methods of organization and traffic management. *Bulleten' transportnoi informatsii*. [Bulletin of transport information], 2010, no. 1 (175), pp.10-15. (In Russ.).
- 4 Skrypnikov A.V. Metody, model i algoritmy povysheniia transportnoeksploatatsionnykh kachestv lesnykh avtomobil'nykh dorog v protsesse proektirovaniia, stroitel'stva i ekspluatatsii [Methods, models and algorithms for improving transport and performance of forest roads in the design, construction and operation]. Moscow, FLINTA: Nauka, 2012. 310 p. (In Russ.).
- 5 Skrypnikov A.V., Skvortsova T.V., Kondrashova E.V. Bandwidth regulated crossroads. *Perspektivnye tekhnologii, transportnye sredstva i oborudovaniie pri proizvodstve, eksplatatii, servise i remonte*. [Emerging technologies, vehicles and equipment in the production, exploitation, service and repair], 2007, no. 2, pp.201-204. (In Russ.).