

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 528.48

**ПРИНЦИП РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ
ВЫПОЛНЕНИИ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

© 2019 Ю.И. Пимшин*, Ю.В. Заяров*, Г.А. Науменко**

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета (МИФИ), Волгодонск, Россия

**Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия

В работе рассмотрена методика определения точности геодезических измерений в процессе мониторинга технического состояния объектов, при условии надежного определения значений деформационных характеристик в пределах нормативных допустимых величин. При этом предложено коэффициент обеспечения точности рассчитывать исходя из значения величины приближения к предельной величине допустимой деформации. Таким образом, определяемая величина текущей деформации не превзойдет ее предельного значения.

Ключевые слова: деформация, измерение, ошибка измерения, измеряемый параметр, физико-механические свойства, допуск.

Поступила в редакцию: 26.10.2018

После доработки 19.11.2018

Принята к публикации 11.12.2018

Рассматривая геометрические признаки $\varphi'_{(геом)}$ деформационных процессов с точки зрения порядка их назначения.

Проектирования инженерных объектов предполагает следующую последовательность назначения геометрических характеристик разрабатываемого объекта [1-2]. На первом этапе проектирования назначаются номинальные расчетные геометрические характеристики, они определяют размеры $\varphi'_{(разм)}$, форму $\varphi'_{(форма)}$, взаимное расположение $\varphi'_{(взаим/расп)}$ элементов разрабатываемого объекта.

$$\varphi'_{(геом)} = \Omega[\varphi'_{(разм)}; \varphi'_{(форма)}; \varphi'_{(взаим/расп)}] \quad (1)$$

Данные параметры задаются абсолютными значениями и определяют вид и габариты проектируемого объекта. На втором этапе назначают проектные геометрические характеристики $\varphi''_{(геом)}$ разрабатываемого объекта, они определяют возможные работоспособные пределы изготовления параметров элементов или их монтажа:

$$\varphi''_{(геом)} = \Omega[\varphi''_{(разм)}(l_1 \pm \Delta l_1; l_2 \pm \Delta l_2; \dots; l_n \pm \Delta l_n); \varphi''_{(форма)}(x_1 \pm \Delta x_1; x_2 \pm \Delta x_2; \dots; x_n \pm \Delta x_n); \varphi''_{(взаим/расп)}(\alpha_1 \pm \Delta \alpha_1; \alpha_2 \pm \Delta \alpha_2; \dots; \alpha_n \pm \Delta \alpha_n)]. \quad (2)$$

где $l_1; l_2; \dots; l_n$ – номинальные параметры, определяющие размеры элементов объекта;
 $\pm \Delta l_1; \pm \Delta l_2; \dots; \pm \Delta l_n$ – допуски на изготовление размеров элементов объекта;
 $x_1; x_2; \dots; x_n$ – номинальные параметры, определяющие форму элементов объекта;

$\pm\Delta x_1; \pm\Delta x_2; \dots; \pm\Delta x_n$ – допуски на изготовление форм элементов объекта;

$\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_n$ – номинальные параметры, определяющие взаимное расположение элементов объекта;

$\pm\Delta\alpha_1; \pm\Delta\alpha_2; \dots; \pm\Delta\alpha_n$ – допуски на изготовление параметров взаимного расположения элементов объекта.

При возведении объекта осуществляют формирование его геометрических параметров. Порядок выполнения формирования геометрических характеристик объекта заключается в том, что, во-первых, осуществляют вынос в натуру заданных параметров. При этом маркируют их положение, которое определяет размеры, форму и взаимное расположение элементов объекта. Во-вторых, осуществляют их возведение и в общем случае на данном этапе осуществляют пошаговый контроль сформированных геометрических параметров. Реализация всех процедур, связанных с выносом в натуру и контролем геометрических параметров, обеспечивается путем использования геодезических методов измерений, точность m_l , m_x , m_α выполнения которых определяется применением коэффициентов обеспечения точности C_i

$$\begin{aligned} m_l &= C_1 \cdot \Delta l_i; \\ m_x &= C_2 \cdot \Delta x_i; \\ m_\alpha &= C_3 \cdot \Delta \alpha_i. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициент обеспечения точности C_i задается либо нормативными документами, например, на общестроительные работы, либо проектной документацией, например, на специальные работы [3-10].

В процессе выполнения контрольно измерительных работ определяются геометрические характеристики объекта, при этом качественными измерения считаются тогда, когда фактические ошибки измерений $\pm m^{(ф)}$ не превосходят расчетных $\pm m$. Фактические ошибки измерений $\pm m^{(ф)}$ определяются либо по результатам уравнивания геодезических построений, или по результатам многократных измерений, или по результатам предварительных исследований методов измерений.

Найденные фактические геометрические параметры $\varphi^{(факт)}_{(геом)}$ определяют качество формирования геометрических характеристик объекта

$$\begin{aligned} \varphi^{(факт)}_{(геом)} &= \Omega \left[\varphi^{(факт)}_{(разм)} \left(l_1^{(ф)} \pm m_{l_1}^{(ф)}; l_2^{(ф)} \pm m_{l_2}^{(ф)}; \dots; l_n^{(ф)} \pm m_{l_n}^{(ф)} \right) \right. \\ &\quad \left. \varphi^{(факт)}_{(форма)} \left(x_1^{(ф)} \pm m_{x_1}^{(ф)}; x_2^{(ф)} \pm m_{x_2}^{(ф)}; \dots; x_n^{(ф)} \pm m_{x_n}^{(ф)} \right) \right. \\ &\quad \left. \varphi^{(факт)}_{(взаим\ расп)} \left(\alpha_1^{(ф)} \pm m_{\alpha_1}^{(ф)}; \alpha_2^{(ф)} \pm m_{\alpha_2}^{(ф)}; \dots; \alpha_n^{(ф)} \pm m_{\alpha_n}^{(ф)} \right) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Если величины $l^{(ф)}_i$, $x^{(ф)}_i$, $\alpha^{(ф)}_i$ близки к предельно допустимым $l_i \pm \Delta l_i$, $x_i \pm \Delta x_i$, $\alpha_i \pm \Delta \alpha_i$ в этом случае из за влияния фактических ошибок измерений $m^{(ф)}_{li}$, $m^{(ф)}_{xi}$, $m^{(ф)}_{\alpha i}$ возможны ситуации, связанные:

- с признанием качественными геометрических параметров некачественных;
- с признанием некачественными геометрическими параметрами качественных (рис. 1).

Выявленные некачественные геометрические параметры отдельных элементов исследуемого объекта могут влиять на его собираемость, на эксплуатационную надежность, на эстетичность архитектурного решения. Вовремя принятое строительное

решение может обеспечить либо устранение данного негативного факта, либо компенсировать (полностью или частично) его влияние.

В процессе эксплуатации объекта осуществляют текущую регистрацию (наблюдение, мониторинг) его геометрических характеристик. При этом следует иметь ввиду то, что на стадии проектирования строительных объектов, для формирования его физических и механических характеристик, широко применяют методику проектирования по предельным его состояниям. То есть определяются номинальные параметры объекта и граничные расчетные критические пределы, в диапазоне которых объект сохраняет работоспособность или целостность.

$$\varphi_4^{(пред)}(физ/мех) = \varphi_4(физ/мех) \pm \Delta\varphi_4(физ/мех) \quad (5)$$

где $\Delta\varphi_4(физ/мех)$ – предельные значения отклонений физико-механических параметров от номинальных значений.

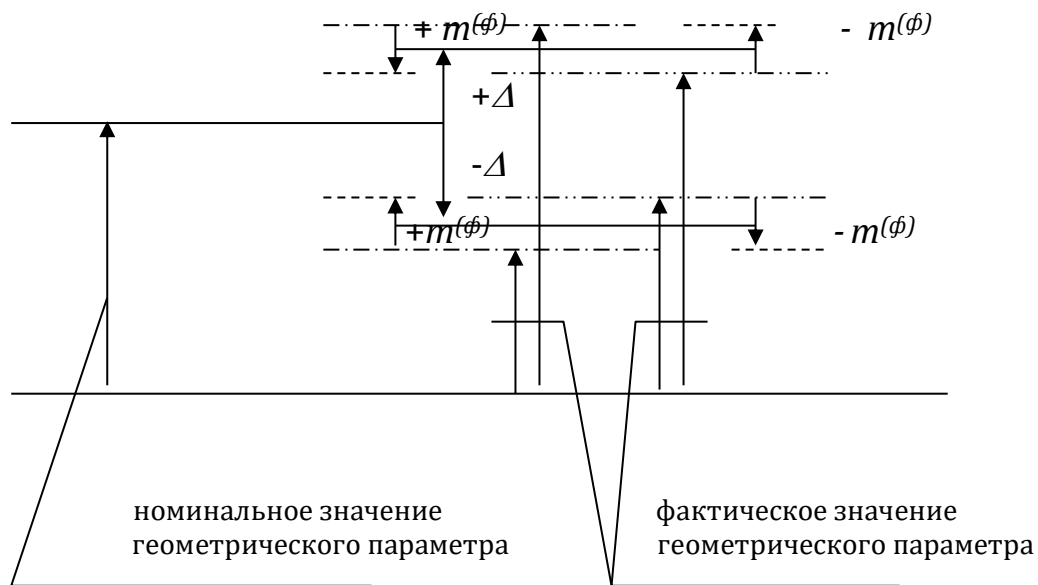


Рисунок 1 – Схема влияния ошибки измерений на достоверность результата измерений [Diagram of the effect of measurement error on the measurement result accuracy]

Параметры объекта и граничные расчетные критические пределы, в диапазоне которых объект сохраняет работоспособность или целостность.

$$\varphi_4^{(пред)}(физ/мех) = \varphi_4(физ/мех) \pm \Delta\varphi_4(физ/мех) \quad (5)$$

где $\Delta\varphi_4(физ/мех)$ – предельные значения отклонений физико-механических параметров от номинальных значений.

Превышение указанных критических пределов приводит к разрушению объекта.

В практике проектирования не допускают назначение параметров объекта с использованием предельных состояний. Всегда предельные значения отклонений $\Delta\varphi_4(физ/мех)$, с целью повышения эксплуатационной надежности проектируемого объекта, уменьшают путем введения коэффициента надежности $C_{i(надежн)}$, при этом

$C_{i(\text{надежн})} < 1$. Таким образом, проектные характеристики объекта определяются:

$$\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{проект})} = \varphi_{4(\text{физ/мех})} \pm (C_{i(\text{надежн})} \cdot \Delta\varphi_{4(\text{физ/мех})}). \quad (6)$$

В процессе возведения объекта, реализацией строительных технологий, обеспечивается формирование его физико-механических свойств $\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{факт})}$.

$$\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{факт})} = \varphi_{4(\text{физ/мех})} \pm \Delta\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{факт})} \quad (7)$$

с соблюдением условия $(C_{i(\text{надежн})} \cdot \Delta\varphi_{4(\text{физ/мех})} \geq \Delta\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{факт})})$.

В процессе эксплуатации объекта на него оказывают влияние нагрузки и воздействия природного и техногенного характера $\Delta'\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл/факт})}$. Причем, данное воздействие, как правило, имеет негативный характер и неизбежно приводит к изменению (в сторону уменьшения) физико-механических свойств объекта:

$$\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл/факт})} = \varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{факт})} - \Delta'\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл/факт})}. \quad (8)$$

Учитывая выше сказанное, еще на стадии проектирования, устанавливаются допустимые эксплуатационные пределы изменения физико-механических свойств объекта:

$$\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл})} = \varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{факт})} - \Delta\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл})}. \quad (9)$$

При этом эксплуатационная надежность объекта обеспечивается при условии $\Delta\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл})} > \Delta'\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл/факт})}$. В случае если $\Delta\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл})} < \Delta'\varphi_{4(\text{физ/мех})}^{(\text{экспл/факт})}$ объект считается аварийным.

В процессе эксплуатации объекта выполняется мониторинг его текущего технического состояния с целью определения степени влияния негативных нагрузок на его характеристики и недопущения его перехода в аварийное состояние путем принятия своевременных мер восстановления эксплуатационной надежности. Для оценки текущего технического состояния объекта контролируют его физические, механические и геометрические параметры. Анализ их изменения обеспечивает формирования представления о состоянии объекта. Определение каждой из названных групп параметров осуществляется путем реализации соответствующих программ и методик с применением необходимых систем контроля.

Реализация процедуры контроля геометрических параметров на стадии эксплуатации объекта имеет существенные отличия от методики контроля такого же рода параметров при возведении объекта. Если на стадии строительства объекта геометрические параметры определяются (в статическом состоянии) и оценивается их соответствие проектным значениям, то на стадии эксплуатации оценивается их изменение (динамические свойства). Реализация данной задачи осуществляется путем повторных измерений геометрических характеристик и их сравнительный анализ, на основе которого строится зависимость изменения геометрических параметров во

времени, прогнозируется состояние геометрических характеристик на заданном предстоящем временном интервале, на основе которого прогнозируется значение приближения текущих геометрических характеристик к допустимым эксплуатационным параметрам. При этом точность геодезических измерений зависит от межциклового временного интервала и от значений приближения текущих геометрических характеристик к допустимым эксплуатационным параметрам. Так для больших временных интервалов при однородной (одинаковой) динамике геометрических характеристик формируются их большие изменения. Как следствие этого для регистрации больших значений изменений допускаются большие ошибки измерений. При равных межцикловых интервалах точность геодезических измерений назначается исходя из значений приближения текущих геометрических характеристик к допустимым эксплуатационным параметрам путем применения коэффициента обеспечения точности C_i также зависящего от названных значений. При этом в первом цикле мониторинга геометрических параметров определяют точность геодезических измерений по стандартной методике:

$$m_{1(геод)} = C_1 \cdot \Delta\varphi_{(физ/мех)}^{(экспл)},$$

где C_i – коэффициент обеспечения точности, задается либо нормативными документами, например, на общестроительные работы, либо проектной документацией, например, на специальные работы.

В процессе осуществления последующих циклов работ контролируют величины фактических геометрических параметров совместно с соответствующими фактическими ошибками измерений:

$$\left[\left(\varphi_{(геом)}^{(экспл)} + \Delta\varphi_{(геом)}^{(экспл)} \right) - \left(\varphi_{(геом)}^{(экспл/факт)} + m_{i(геод)}^{(\phi)} \right) \right] \leq 0 \quad (10)$$

Если данное неравенство для текущего цикла i выполняется, то результаты измерений, полученные в нем, не принимаются в обработку. Вычисляется C_i :

$$C_i = \left[\left(\varphi_{(геом)}^{(экспл)} + \Delta\varphi_{(геом)}^{(экспл)} \right) - \varphi_{(геом)}^{(экспл/факт)} \right] / \Delta\varphi_{(геом)}^{(экспл)}. \quad (11)$$

Затем определяют точность геодезических измерений в i цикле:

$$m_{i(геод)} = C_i \left[\left(\varphi_{(геом)}^{(экспл)} + \Delta\varphi_{(геом)}^{(экспл)} \right) - \varphi_{(геом)}^{(экспл/факт)} \right]. \quad (12)$$

Далее геодезические работы в i цикле повторяются заново и продолжают осуществлять последующие за ним циклы до выполнения условия (10) (рис. 2).

Реализация описанной методики обеспечивает определение текущего состояния геометрических параметров объекта при условии, что его состояние не перейдет к условию $\Delta\varphi_{(физ/мех)}^{(экспл)} < \Delta'\varphi_{(физ/мех)}^{(экспл/факт)}$, характеризующему аварийное состояние. При этом следует понимать то, что геодезические технологии контроля позволяют определить техническое состояние объекта, но не восстановить его до эксплуатационно пригодного. Геодезические данные являются информацией для своевременного планирования и принятия соответствующих строительных решений.

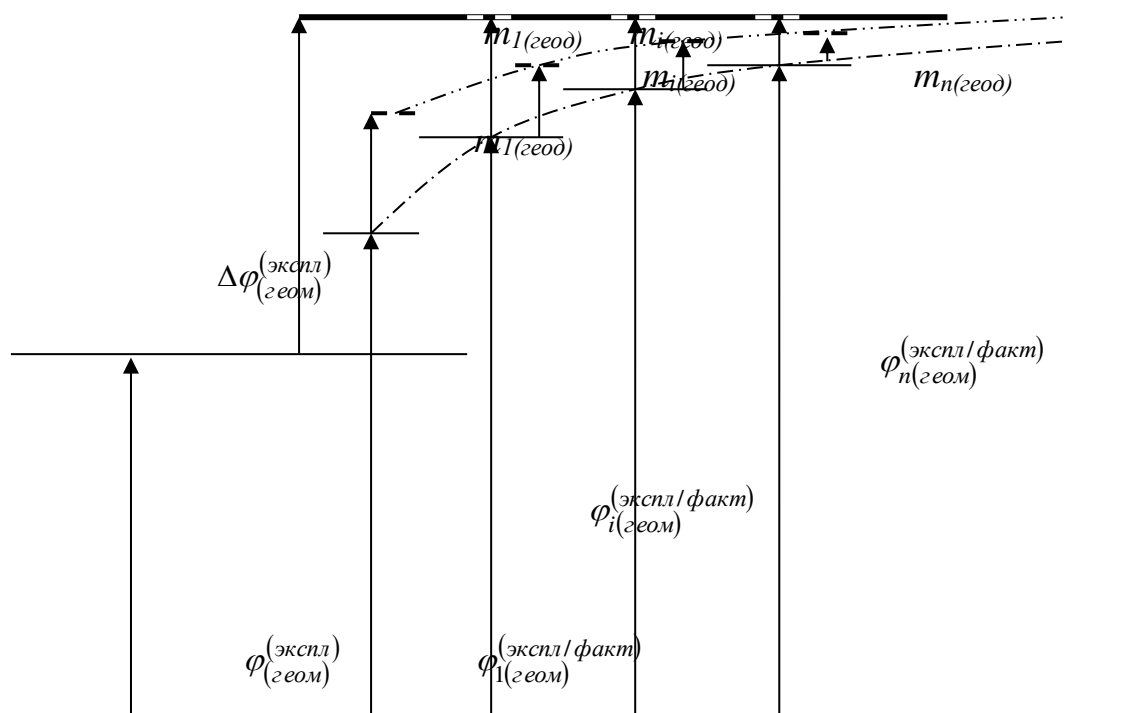


Рисунок 2 – Схема определения точности геодезических измерений исходя из значений приближения текущих геометрических характеристик к допустимым эксплуатационным параметрам [Scheme for determining the accuracy of geodesic measurements based on the values of the approximation of the current geometric characteristics to the permissible operating parameters]

При проектировании мониторинга необходимо оценить значимость связей, зоны их проявления, ожидаемые величины параметров, отнесенных к ним. Это можно осуществить на основе анализа ранее полученного (имеющегося) опыта выполнения аналогичных исследований, математического моделирования процесса и т.д. На основе данной априорной информации формируется программа мониторинга, результатом которого является информация о текущем состоянии объекта, т.е. его эксплуатационной надежности, оценивается остаточный ресурс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столбов, Ю.В. Допуски и средства проверки качества строительно-монтажных работ [Текст] / Ю.В. Столбов // Геодезические методы контроля точности в строительстве. – Куйбышев : Куйбышевский гос. ун-т. – 1983. – С. 63-65.
2. Справочник по геодезическим работам в строительно-монтажном производстве [Текст] / Под ред. Ю.В. Полищук – Москва : Недра, 1990. – 336 с.
3. Абаджи, К.И. Контроль взаимного расположения поверхностей деталей машин [Текст] / К.И. Абаджи, В.И. Дружинин, В.И. Исаев. – Ленинград : Машгиз, 1962. – 116 с.
4. ГОСТ 21779-76 Система обеспечения точности геометрических параметров. Технологические допуски геометрических параметров. – 1976. – 11 с. URL : <http://gostt.ru/Index/22/22039.htm> (дата обращения: 10.08.2018)
5. Голендухин, М.А. Обоснование норм точности на геодезические разбивочные работы и контрольные измерения при строительстве и эксплуатации промышленных сооружений: автореф. дис. канд. тех. наук по спец. 05.24.01 [Текст] / М.А. Голендухин. – Новосибирск : НИСИ, 1974. – 23 с.
6. Жуков, В.Н. Нормирование точности геодезических измерений при возведении сооружений, монтаже оборудования и контроле за их состоянием [Текст] / В.Н. Жуков // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – Вып. 4. – 1983. – С. 28-35.
7. Бородко, А.В. Развитие системы геодезического обеспечения в современных условиях [Текст] / А.В. Бородко, Н.Л. Макаренко, Г.В. Демьянов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – № 10. – 2003. – С. 7-13.

8. Ключин, Е.Б. Инженерная геодезия [Текст] / Е.Б. Ключин, М.И. Киселев, Д.Ш. Михелев, В.Д. Фельдман. – Москва : Высшая школа, 2002. – 480 с.
9. Ключин, Е.Б. Создание плановой разбивочной основы на монтажном горизонте при строительстве зданий повышенной этажности [Текст] / Е.Б. Ключин, Заки Мохамед Зейдан Эль-Шейха, Е.П. Власенко // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – № 5. – 2009. – С. 48-54.
10. Ямбаев, Х.К. Разработка и внедрение высокоточных геодезических измерений в проектирование и эксплуатацию уникальных инженерных сооружений России [Текст] / Х.К. Ямбаев, Г.Е. Рязанцев // Международная научно-техническая конференция, посвященная 225-летию МИИГАиК. – Москва, 2004. – 126 с.

REFERENCES

- [1] Stolbov Yu.V. Dopuski i sredstva proverki kachestva stroitel'no-montazhnyh работ [Tolerances and Means of Quality Control of Construction Works]. Geodezicheskie metody kontrolya tochnosti v stroitel'stve [Geophysical Methods of Accuracy Control in Construction]. Kuibyshev state UN-T. 1983. P. 63-65 (in Russian).
- [2] Spravochnik po geodezicheskim rabotam v stroitel'no-montazhnom proizvodstve [Reference for Geodesic Works in the Construction Trade]. Ed. by Y.V. Polishchuk. Moscow: Nedra. 1990. 336 p. (in Russian).
- [3] Abadzhi K.I., Druzhinin V.I., Isaev V.I. Kontrol' vzaimnogo raspolozheniya poverhnostej detalej mashin [Control of the Mutual Position of Machine Part Surfaces]. – Leningrad: Mashgiz. 1962. 116 p. (in Russian)
- [4] GOST 21779-76 Sistema obespecheniya tochnosti geometricheskikh parametrov. Tekhnologicheskie dopuski geometricheskikh parametrov [The system of Ensuring the Accuracy of Geometric Parameters. Technological Tolerances of Geometrical Parameters]. 1976. 11 p. URL : <http://gostt.ru/Index/22/22039.htm> (in Russian).
- [5] Golendukhin M.A. Obosnovanie norm tochnosti na geodezicheskie razbivochnye raboty i kontrol'nye izmereniya pri stroitel'stve i ekspluatatsii promyshlennyh sooruzhenij [Justification of Accuracy Standards for Geodetic Center Work and Control Measurements in the Construction and Operation of Industrial Facilities. Abstract. on competition of a scientific degree. Academic Step. Ph. D. in engineering, 05.24.01. Novosibirsk, NISI]. 1974. 23 p. (in Russian).
- [6] Zhukov V.N. Normirovanie tochnosti geodezicheskikh izmerenij pri vozvedenii sooruzhenij, montazhe oborudovaniya i kontrole za ih sostoyaniem [Regulation of the Accuracy of Geodesic Measurements in the Construction of Facilities, Installation of Equipment and Monitoring of their Condition]. Izv. vuzov. Geodeziya i aerofotosemka. WPI [Higher Educational. Geodesy and Aerial Photography]. Issue.4. 1983. P. 28-35 (in Russian).
- [7] Borodko A.B., Makarenko H.L., Demyanov G.V. Razvitie sistemy geodezicheskogo obespecheniya v sovremennyh usloviyah. [Development of the Geodesic Support System in Modern Conditions]. Moskva: Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka [Moscow: University News. Geodesy and Aerial Photography]. № 10. 2003. P. 7-13 (in Russian)
- [8] Klyushin E.B., Kiselev M.I., Mikhalev D.S., Feldman V.D. Mihalev D.Sh. Inzhenernaya geodeziya [Engineering Geodesy]. Moskva: Vysshaya Shkola [Moscow: Higher school]. 2002. 480 p. (in Russian).
- [9] Klyushin E.B., Zaki Mohamed Zeidan El-Sheikha, Vlasenko E.P. Sozdanie planovoj razbivochnoj osnovy na montazhnom gorizonte pri stroitel'stve zdaniy povyshennoj etazhnosti [Creation of Planned Center Basis on the Installation Horizon in the Construction of High-Rise Buildings]. Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotosemka [University News. Geodesy and Aerial Photography]. № 6. 2009. P. 48-54 (in Russian).
- [10] Yambaev H.K., Ryzantsev G.E. Razrabotka i vnedrenie vysokotochnykh geodezicheskikh izmerenij v proektirovanie i ekspluatatsiyu unikal'nykh inzhenernykh sooruzhenij Rossii [Development and Implementation of High-Precision Geodetic Measurements in the Design and Operation of Unique Engineering Structures of Russia]. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya, posvyashchennaya 225-letiyu MIIGAiK [International Scientific and Technical Conference Dedicated to the 225th Anniversary of MIIGAiK]. Moscow. 2004. 126 p. (in Russian).

Principle of Accuracy Calculation of Measurements during Deformation Process Monitoring

Yu.I. Pimshin ^{*1}, Yu.V. Zayrov ^{*2}, G.A. Naumenko ^{**3}

**Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹ORCID iD: 0000-0001-6610-8725

WoS Researcher ID: J-6791-2017

e-mail: YIPimshin@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0003-3353-8037

WoS Researcher ID: G-7342-2019

e-mail: YVZayarov@mephi.ru

*** Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000*

³ORCID iD: 0000-0002-7512-4687

WoS Researcher ID: J-7170-2017

e-mail: geodez@aanet.ru

Abstract – The paper considers the method of determining the accuracy of geodesic measurements in the process of monitoring the technical condition of objects, provided the reliable determination of the deformation characteristics values within the normative permissible values.

Keywords: deformation, measurement, measurement error, measured parameter, physical and mechanical properties, tolerance.