

УДК 528.31/.41

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-56-65

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПОРНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА КРУПНОГАБАРИТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Татьяна Михайловна Медведская

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ст. преподаватель кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела, тел. (383)343-29-55, e-mail: mtm2112@yandex.ru

Статья посвящена исследованию точности опорных сетей для геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования. Анализ точности опорных сетей выполнен на основе технологии КРЕДО. Математическая обработка опорной сети, созданной на производственном объекте, показала, что форма и ориентировка средних квадратических эллипсов ошибок в ряде случаев невыгодна для определения координат станций, с которых выполняются измерения геометрических элементов агрегата. При построении опорной сети для выполнения геодезического мониторинга промышленного оборудования наибольшее предпочтение имеет приближение среднего квадратического эллипса к кругу ошибок, когда точность положения пункта приобретает одинаковые значения по всем направлениям. Рассмотренная методика математической обработки опорной сети на этапе проектирования или окончательного ее уравнивания позволяет получить оптимальные результаты в точности координат определяемых пунктов за счет анализа и выбора оптимального решения. Это в свою очередь позволяет повысить точность определения геометрических параметров крупногабаритного промышленного оборудования при геодезическом мониторинге.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, оценка точности, пункты опорной сети, средняя квадратическая ошибка, ориентировка эллипсов ошибок, технологии КРЕДО, баланс весов угловых и линейных измерений.

Введение

В различных отраслях промышленности применяется крупногабаритное промышленное оборудование, такое как обжиговые печи, барабанные сушилки и др. Как правило, такое оборудование эксплуатируется в сложных условиях вибрации, влажности, высоких температур, запыленности и радиации. Даже незначительные деформации геометрических элементов промышленных агрегатов могут приводить к аварийным ситуациям. Своевременные геодезические наблюдения позволяют осуществлять контроль геометрических параметров исследуемых объектов, анализировать их эксплуатационные характеристики и планировать мероприятия по своевременному ремонту.

Геодезический мониторинг крупногабаритного промышленного оборудования осуществляется с использованием различных измерительных приборов, таких как электронные тахеометры, лазерные сканеры и др. [1–18].

Для выполнения геодезических измерений требуется высокоточная опорная сеть, которая часто создается с помощью электронного тахеометра методом линейно-углового построения. Определение места положения прибора основа-

но на методике последовательного наращивания измерений способом «свободной» станции. При определении мест положения тахеометра используются опорные геодезические знаки, которые закрепляются светоотражающими марками на элементах жестких конструкций, расположенных вдоль объекта наблюдений. Относительно пунктов созданной таким образом сети определяются геометрические параметры исследуемого объекта. Соответственно, точность определения параметров промышленного оборудования напрямую зависит от точности построения элементов опорной геодезической сети.

В опубликованных материалах [2] отмечалось, что точность определения геометрических параметров обжиговых машин и других крупногабаритных агрегатов в большей степени зависит от геометрической схемы измерений, чем от точности измерения углов и расстояний. Из-за стесненных производственных условий работы место для размещения опорных знаков весьма ограничено. Поэтому изменение положения пунктов не способствует оптимальному проектированию сетей. Вместе с тем, небольшие перемещения пунктов в ограниченном пространстве ненамного улучшают качество сети.

Целью настоящей работы является исследование точности опорных сетей для геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования. Работа выполнялась на основе производственных материалов, полученных при геодезическом мониторинге обжиговых машин на предприятии АО «Искитимцемент».

Методы и материалы

Рассмотрим линейно-угловую сеть, построенную для выверки вращающейся обжиговой печи на АО «Искитимцемент», которая состоит из 41 пункта, 26 станций и 126 целей для измерения направлений и расстояний. Количество избыточных измерений в данной сети – 85.

Для математической обработки сети и установления условной системы координат заданы один исходный пункт и один исходный дирекционный угол линии, расположенной вдоль наблюдаемого объекта. Уравнивание и оценка точности сети выполнена по методу наименьших квадратов.

На рис. 1 показан фрагмент исследуемой опорной сети, где настенные марки обозначены цифрами, а места установки электронного тахеометра – буквой и цифрой (Т5, Т6 и т. д.).

По технологии КРЕДО выполнен предрасчет точности сети при условии, что измерения углов производились с ошибкой $0,7''$, а длин линий – с ошибкой $0,7$ мм.

Предрасчет точности показал, что сеть является высокоточным геодезическим построением, ожидаемые средние квадратические погрешности (СКП) определения координат не превышают $2,3$ мм в плане и $1,3$ мм по высоте.

Ошибки положения некоторых пунктов опорной сети приведены в таблице.

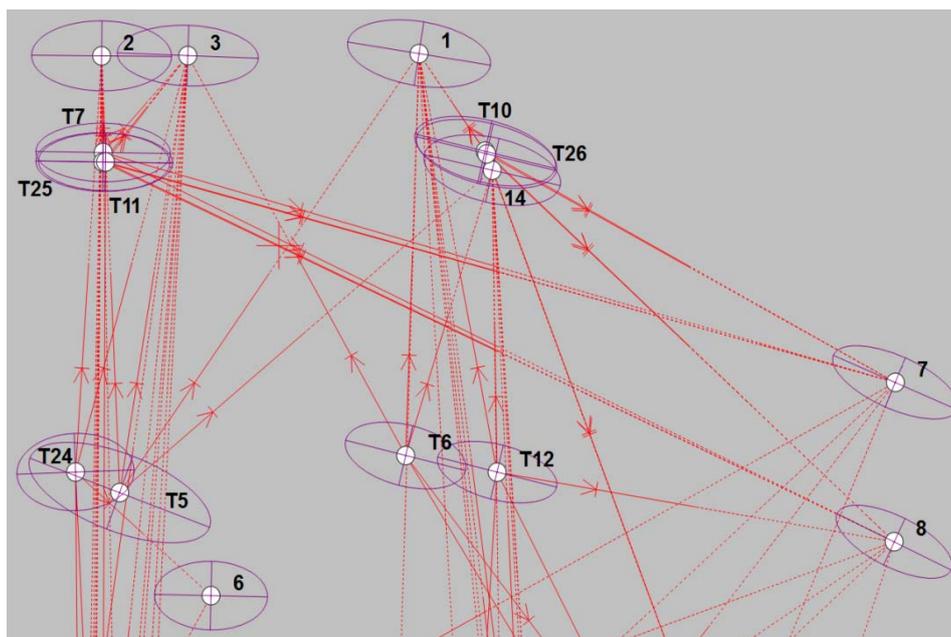


Рис. 1. Фрагмент схемы опорной геодезической сети на АО «Искитимцемент»

Ведомость оценки точности положения пунктов

Пункт	M	Mx	My	a	b	α	Mh
1	0,0018	0,0007	0,0016	0,0016	0,0007	98°54'13"	0,0008
2	0,0017	0,0008	0,0016	0,0016	0,0008	90°30'34"	0,0007
3	0,0017	0,0007	0,0016	0,0016	0,0007	92°04'13"	0,0007
4	0,0007	0,0007	0,0001	0,0007	0,0001	169°44'02"	0,0002
5	0,0003	0,0002	0,0002	0,0003	0,0001	139°37'04"	0,0002
6	0,0015	0,0007	0,0013	0,0013	0,0007	91°15'13"	0,0008
7	0,0016	0,0008	0,0014	0,0015	0,0006	112°56'54"	0,0008
8	0,0015	0,0008	0,0013	0,0014	0,0006	115°27'47"	0,0008
T5	0,0023	0,0011	0,0020	0,0022	0,0008	110°22'27"	0,0008
T6	0,0015	0,0007	0,0014	0,0014	0,0007	103°40'35"	0,0008

Детальный анализ точности показывает, что ориентировка средних квадратических эллипсов ошибок в ряде случаев невыгодна для определения координат станций, с которых выполняются измерения геометрических элементов агрегата. Как видно из рис. 1, большие полуоси эллипсов ошибок направлены перпендикулярно к оси агрегата (например, пункты T7, T11, T24, T25 и др.), что приводит к увеличению ошибки определения места положения центральной точки кругового сечения и его радиуса.

Если большие полуоси эллипсов ошибок направлены вдоль агрегата, то это обстоятельство, в свою очередь, приведет к увеличению ошибки длины его оси вращения. Поэтому управление эллипсами ошибок, то есть точностью самой сети, является актуальной задачей.

На форму и ориентировку эллипсов ошибок может оказывать целый ряд факторов, таких как точность угловых и линейных измерений, количество избыточных измерений, форма и конструкция сети, а также соотношение весов для углов и линий.

При построении опорной сети для геодезического мониторинга обжиговой печи наибольшее значение имеет приближение среднего квадратического эллипса к кругу ошибок, когда точность положения пункта является одинаковой по всем направлениям.

Получить желаемое решение можно путем сравнения результатов уравнивания и оценки точности, меняя соотношение весов угловых и линейных измерений. В технологии КРЕДО имеется возможность изменить баланс весов угловых и линейных измерений и добиться лучшей ориентировки эллипсов ошибок в процессе математической обработки сети и ее проектирования.

В программе КРЕДО_DAT реализовано совместное уравнивание линейных и угловых измерений. При этом уравнивание выполняется по методу наименьших квадратов параметрическим способом. Для достижения целевого решения используется способ итераций по критерию минимизации суммы квадратов поправок в измерения

$$PAx - Pb = Pv,$$

где P – матрица весов; A – матрица коэффициентов; b – вектор измеренных значений; x – искомый вектор поправок в координаты определяемых пунктов; v – вектор невязок.

При уравнивании определяется вектор x поправок, при котором сумма квадратов элементов вектора Pv достигает минимального значения.

В процессе решения системы уравнений поправок в данной технологии используется итерационный алгоритм. Причем на каждой итерации вычисляются поправки в координаты пунктов, а затем коэффициенты уравнений рассчитываются заново и процесс повторяется. Работа программы завершается, если выполняется одно из условий:

- процесс вычислений прерван исполнителем;
- среднее квадратическое значение поправок в координаты в очередной итерации не превосходит заданного значения погрешности, установленной для параметров уравнивания;
- число итераций превышает максимально допустимое значение.

Выбор весов основан на необходимости выполнения нескольких условий, в том числе согласованности уравнений, соответствующих угловым и линейным измерениям.

Для вычисления весов P используется не только значение допустимой СКП, но и балансовый коэффициент для линейных и угловых уравнений, установленный при настройке параметров уравнивания (рис. 2).

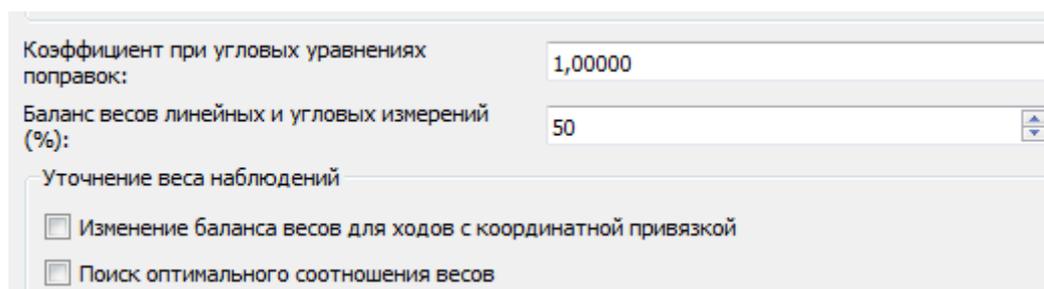


Рис. 2. Настройка баланса весов угловых и линейных измерений

При установке параметра «Поиск оптимального соотношения весов» запускается большое количество итераций уравнивания. В каждой итерации происходит изменение весов измерений. Так продолжается, пока не будет найдено оптимальное соотношение весов, либо алгоритм определит, что оптимальные веса установить невозможно.

Соотношение весов определяет относительную точность линейных и угловых измерений, что позволяет, задав малый весовой коэффициент для угловых уравнений, имитировать безошибочность измерения расстояний, и наоборот, задав большой коэффициент, имитировать безошибочность угловых измерений. Коэффициент может варьироваться в пределах от 0,01 до 10 000, что приводит к изменению влияния веса угловых измерений на результаты уравнивания.

Настройка соотношения весов в режиме проектирования сетей позволяет выбрать точность измерений, оптимальную для обеспечения требуемой точности координат пунктов опорной сети и таким образом повлиять на форму и ориентировку средних квадратических эллипсов ошибок. Предпочтительным вариантом, конечно, является тот, при котором эллипс превращается в круг ошибок, обеспечивающий одинаковую точность положения пунктов по всем направлениям на плоскости.

В качестве эксперимента изменим баланс весов угловых и линейных измерений (рис. 3) для получения приемлемых оценок положения пунктов опорной сети, приведенной на рис. 1.

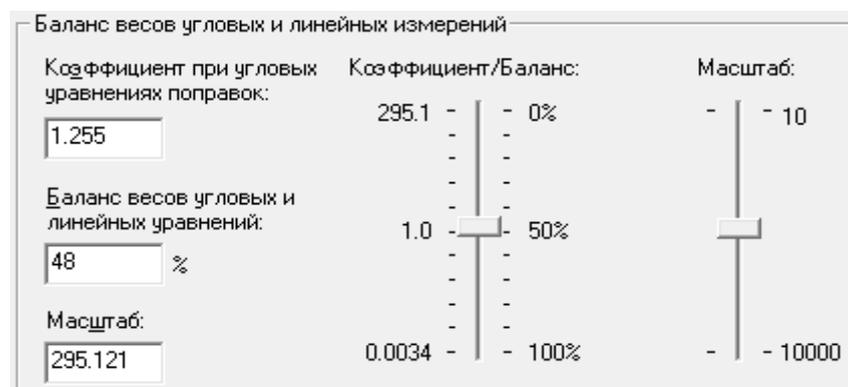


Рис. 3. Настройка баланса весов угловых и линейных измерений

В данном случае (рис. 4) при балансе весов 48 % эллипсы ошибок в большей степени приближаются к кругу ошибок, что приводит к одинаковым смещениям пунктов по всем направлениям на плоскости. На рис. 1 эллипсы положения пунктов опорной сети были получены при балансе весов угловых и линейных уравнений 50 % и коэффициенте угловых уравнений поправок, равном 1.

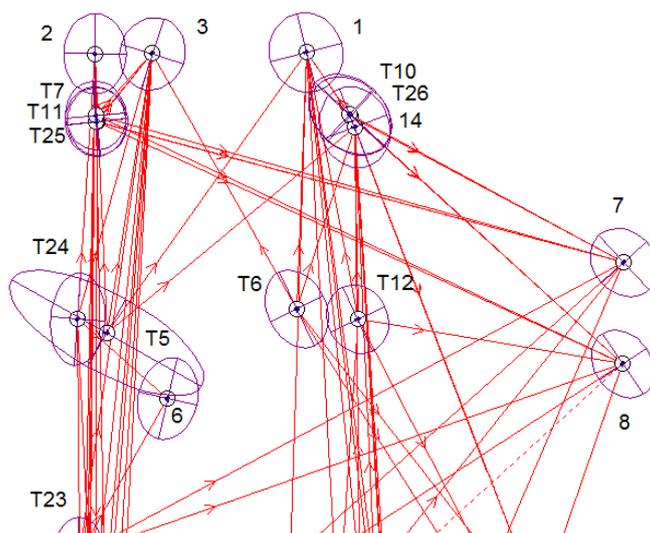


Рис. 4. Эллипсы ошибок при балансе весов угловых и линейных уравнений, равном 48 %

Сравнительный анализ результатов, приведенных на рис. 1 и рис. 4, показывает, что не на всех пунктах получен круг ошибок. При высокоточных измерениях углов и линий и большом количестве избыточных измерений изменение баланса мало влияет на ориентировку эллипса ошибок. Например, на пункте Т5 (рис. 4), на котором измерено четыре направления (Т5-1, Т5-14, Т5-3, Т5-2), эллипс ошибок почти не изменился по своей форме и ориентировке. В этом случае целесообразно выполнить дополнительное измерение по направлению большей полуоси эллипса, например Т5-6 (рис. 5).

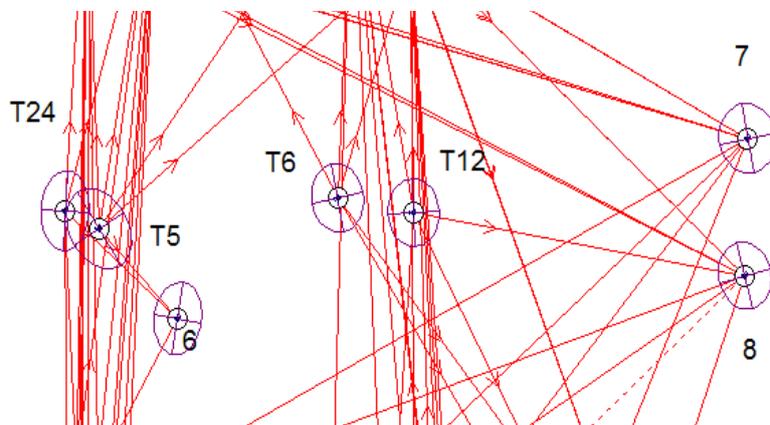


Рис. 5. Результат обработки сети при дополнительном измерении направления Т5-6

Как видно из рис. 5, дополнительное направление Т5-6 способствовало изменению формы, размеров и ориентировки эллипса ошибок.

Заключение

На основе выполненного исследования точности опорных сетей для геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования предложена методика управления точностью положения пунктов путем подбора баланса весов угловых и линейных измерений с помощью КРЕДО-технологии.

Управление точностью сети достигается за счет изменения формы и ориентировки эллипсов ошибок.

Рассмотренная методика математической обработки опорной сети позволяет получить на этапе проектирования или окончательного ее уравнивания оптимальные результаты в точности координат определяемых пунктов за счет сравнительного анализа и принятия соответствующего решения по выбору соотношения весов угловых и линейных измерений. Это позволяет получить необходимую точность определения геометрических параметров обжиговой машины при геодезическом мониторинге.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асташенков Г. Г. Геодезические работы при эксплуатации крупногабаритного промышленного оборудования. – М. : Недра, 1986. – 151 с.
2. Могильный С. Г., Шоломицкий А. А., Фролов И. С. Геодезический мониторинг и выверка металлургического оборудования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 132–143.
3. Неволин А. Г., Медведская Т. М. Влияние ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров крупногабаритного технологического оборудования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 13–19.
4. Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования / А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова, В. А. Середович, А. В. Середович, Г. Н. Ткачева, С. С. Студенков // Геодезия и картография. – 2006. – № 6. – С. 12–14.
5. Поклад Г. Г., Гриднев С. П. Геодезия : учеб. пособие для вузов. – М. : Академический проект, 2007. – 592 с.
6. Никонов А. В. Особенности применения современных геодезических приборов при наблюдении за осадками и деформациями зданий и сооружений объектов энергетики // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 4 (24). – С. 12–19.
7. Жуков Б. Н. Роль, теория и практика геодезического контроля технического состояния зданий и сооружений // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 11–17.
8. Никонов А. В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 43–54.

9. Фолькер Швигер, Ли Чжан, Йюрген Швейцер. Оценка качества инженерно-геодезических работ в строительстве // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 25–45.
10. Хорошилов В. С. Оптимизация выбора методов и средств геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 117–125.
11. Точность определения геометрических параметров вращающихся агрегатов при «холодной» выверке / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Середович, А. А. Лунев // Материалы международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования» (г. Владивосток, 14–18 сентября 2015 г.). – Владивосток : ФГАОУ ВПО «ДВФУ», 2015. – С. 245–249.
12. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М. : Наука, 1974. – 832 с.
13. Уставич Г. А. Геодезия. В 2-х кн. Кн. 1: учебник для вузов. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 352 с.
14. Исследование методов определения геометрических параметров вращающихся агрегатов по данным лазерного сканирования / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Иванов, А. В. Середович, Е. К. Лагутина, А. В. Мартынов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 89–107.
15. Горяинов И. В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 28–39.
16. Асташенков Г. Г., Барлиани А. Г., Колмогоров В. Г. Коррелятная версия уравнивания и оценки точности геодезических сетей с равномерно измеренными величинами методом псевдооптимизации // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 4 (36). – С. 52–65.
17. Kai Zheng, Yun Zhang, Lei Liu, Chen Zhao. An Online Straightness Deviation Measurement Method of Rotary Kiln Cylinder // Tehnički vjesnik. – 2017. – No. 24 (5). – P. 1297–1305. doi: 10.17559/TV-20150426160032.
18. Kai Zheng, Yun Zhang, Chen Zhao and Lei Liu. Rotary Kiln Cylinder Deformation Measurement and Feature Extraction Based on EMD Method // Engineering Letters. – 2015. – No. 23 (4). – P. 283–291.

Получено 10.04.2019

© Т. М. Медведская, 2019

STUDY OF ACCURACY OF REFERENCE NETWORKS FOR GEODESIC MONITORING OF LARGE-SIZE INDUSTRIAL MACHINERY

Tatiana M. Medvedskaya

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Senior Lecturer, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying, phone: (383)343-29-55, e-mail: mtm2112@yandex.ru

The purpose of the work is to study the accuracy of the reference networks for geodetic monitoring of large industrial machinery. The analysis of the accuracy of reference networks is based on the CREDO technology. Mathematical processing of the reference network created at the production facility showed that the shape and orientation of the mean square error ellipses in some cases is not beneficial to determining the coordinates of the stations from which measurements of the geometric elements of the aggregate are performed. When constructing the reference network for performing geodetic monitoring of industrial machinery, the approximation of the mean square ellipse

to the circle of errors matters most when the accuracy of the position of the point acquires the same values in all directions. At the design stage or final leveling the considered method of mathematical processing of the reference network allows obtaining optimal results in the exact coordinates of the points to be determined by analyzing and choosing the optimal solution. This, in turn, will improve the accuracy of the determining geometrical parameters of large-scale industrial machinery during geodetic monitoring.

Key words: geodesic monitoring, accuracy assessment, reference network points, mean square errors, orientation of error ellipses, CREDO technology, balance of weights of angular and linear measurements.

REFERENCES

1. Astashenkov, G. G. (1986). *Geodezicheskie raboty pri ekspluatatsii krupnogabaritnogo promyshlennogo oborudovaniya* [Geodetic works in the process of large-size industrial equipment operation]. Moscow: Nedra Publ., 151 p. [in Russian].
2. Mogilny, S. G., Sholomitsky, A. A., & Frolov, I. S. (2013). Geodetic monitoring and of the metallurgical equipment adjustment. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2013: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2013: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying] (pp. 132–143). Novosibirsk: SSGA Publ. [in Russian].
3. Nevolin, A. G., & Medvedskaya, T. M. (2016). Influence of initial data errors on large-size equipment geometric parameters determination accuracy. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, markshejderiya* [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying] (pp. 13–19). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
4. Komisarov, A. V., Komisarov, D. V., Shirokova, T. A., Seredovich, V. A., Seredovich, A. V., Tkachyova, G. N., & Studenkov, S. S. (2006). Monitoring of structures deformations in combination with 3D modeling technology. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography], 6, 12–14 [in Russian].
5. Poklad, G. G., & Gridnev, S. P. (2007). *Geodeziya* [Geodesy]. Moscow: Akademicheskij proekt Publ., 592 p. [in Russian].
6. Nikonov, A. V. (2013). Some peculiarities of modern surveying instruments application in the process of observations for buildings and structures sediment and deformation of power generating objects. *Vestnik SGGGA* [Vestnik SSGA], 4(24), 12–19 [in Russian].
7. Zhukov, B. N. (2006). Role, theory, and practice of geodetic control of buildings and other types of structures technical state. *Vestnik SGGGA* [Vestnik SSGA], 11, 11–17 [in Russian].
8. Nikonov, A. V. (2015). Investigation of distance measurement accuracy with electron tacheometer in a non-reflection mode. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 1(29), 43–54 [in Russian].
9. Shviger, F., Zhang, L., & Schweitzer, Y. (2011). Assessment of engineering and geodetic works quality in the process of building. *Vestnik SGGGA* [Vestnik SSGA], 3(16), 25–45 [in Russian].
10. Horoshilov, V. S. (2006). Optimization of the geodetic support methods and techniques in the process of technological equipment installation. *Vestnik SGGGA* [Vestnik SSGA], 11, 117–125 [in Russian].
11. Mogilny, S. G., Sholomitsky, A. A., Seredovich, A. V., & Lunev, A. A. (2015). Accuracy of rotating aggregates geometrical parameters determination in "cold" adjustment. In *Sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii: Sovremennye tekhnologii i razvitie politekhnicheskogo obrazovaniya* [Proceedings of the International Scientific Conference: Modern

Technologies and Development of Polytechnical Education] (pp. 245–249). Vladivostok: Far Eastern Federal University Publ. [in Russian].

12. Korn, G., & Korn, T. (1974). *Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov* [Reference book on mathematics for scientists and engineers]. Moscow: Nauka Publ., 832 p. [in Russian].

13. Ustavich, G. A. (2012). *Geodeziya: Kn. 1* [Geodesy: Book 1]. Novosibirsk: SSGA Publ., 352 p. [in Russian].

14. Mogilny, S. G., Sholomitsky, A. A., Ivanov, A. V., Seredovich, A. V., Lagutina, E. K., & Martynov, A. V. (2018). Research of rotating aggregates geometrical parameters determination methods on the basis of laser scanning. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 23(3), 89–107 [in Russian].

15. Goryainov, I. V. (2018). Pilot studies of linear – angular resection application for point stability estimation in horizontal deformation geodetic network. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 23(1), 28–39 [in Russian].

16. Astashenkov, G. G., Barliani, A. G., & Kolmogorov, V. G. (2016). The correlation version of geodetic networks adjustment and accuracy estimation with equally – accurate measured values through pseudo-optimization method. *Vestnik SGUGiT* [Vestnik SSUGT], 4(36), 52–65 [in Russian].

17. Kai Zheng, Yun Zhang, Lei Liu, & Chen Zhao. (2017). An Online Straightness Deviation Measurement Method of Rotary Kiln Cylinder. *Tehnički vjesnik*, 24(5), 1297–1305. doi: 10.17559/TV-20150426160032.

18. Kai Zheng, Yun Zhang, Chen Zhao, & Lei Liu. (2015). Rotary Kiln Cylinder Deformation Measurement and Feature Extraction Based on EMD Method. *Engineering Letters*, 23(4), 283–291.

Received 10.04.2019

© T. M. Medvedskaya, 2019