

В. Н. Блащук, И. А. Бунов, Хоанг Шон Минь, В. Н. Лубенко

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТАХЕОМЕТРОВ
В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ,
ПРИВЯЗАННОЙ К КОРПУСУ СУДНА**

V. N. Blashchuk, I. A. Bunov, Hoang Son Minh, V. N. Lubenko

**THEORETICAL BASES OF LASER TACHEOMETERS APPLICATION
IN THE MEASUREMENT SYSTEM
ATTACHED TO THE HULL OF THE VESSEL**

Рассматривается математическая основа пересчета системы координат с локальной (тахеометр) в объектную (судна) при измерении координат точек на корпусе судна. Приведена блок-схема проверки при сборке корпуса судна на поточной линии с использованием лазерных тахеометров. Применение бесконтактных методов измерений в корпусостроении позволяет повысить производительность труда и конкурентоспособность верфей.

Ключевые слова: тахеометр, проверка, измерительная система, объектная система координат, локальная система координат, пересчет координат.

The paper presents a mathematical basis of recalculation of coordinates system with local (tacheometer) in objective (ship) at measurement of points coordinates on the hull of the vessel. It is shown a block diagram of testing at the assembly of the hull on the production line using laser tacheometers. The use of non-contact measurement techniques in hull production can improve productivity and competitiveness of shipyards.

Key words: tacheometer, control, measurement system, object coordinate system, local coordinate system, recalculation of coordinates.

Введение

Современное мировое судостроение характеризуется переходом к более совершенным технологиям изготовления деталей и сборки узлов корпуса судна, внедрением модульного и зонального методов проектирования и строительства судов и другой морской техники.

В этих условиях все более актуальными становятся вопросы повышения точности сборки, совершенствования технологии выполнения судовых проверочных работ, обеспечения собираемости крупногабаритных корпусных и монтажных единиц.

Корпусные конструкции (секции) и корпус судна в целом могут перемещаться и наращиваться в процессе сборки с позиции на позицию. Известны способы контроля неподвижных конструкций [1] – корпусов судов, собираемых, например, на наклонных стапелях. Однако в судостроении развиты поточно-позиционные методы сборки конструкций с передвигкой их с позиции на позицию. Так собирают секции на современных поточных линиях, так собирают корпуса мелких и средних судов на конвейерных линиях. При этом необходимо обеспечить контроль положения вновь устанавливаемых конструкций по отношению к ранее установленным и собранным, составляющим проверочную базу.

Настоящая работа посвящена развитию методов контроля устанавливаемых конструкций с привязкой базы к перемещаемому объекту.

Измерение координат точек объекта тахеометром

Несовершенство средств измерений сдерживает развитие технологий и оборудования для сборки и монтажа судовых конструкций и механизмов. Основная часть трудоемкости постройки судна (в среднем 40 %) приходится на долю корпусных видов производства.

В настоящее время в измерительной технике наблюдается прорыв, связанный с созданием цифровых трехмерных измерительных станций, способных с высокой точностью и в режиме «реального времени» выдавать объемную цифровую информацию о геометрической форме крупногабаритных объектов. В практике мирового судостроения стали применяться бесконтактные методы измерения координат объектов на основе оптических измерительных систем (электронные безотражательные тахеометры, оптические электронные лазерные теодолиты,

нивелиры), обеспечивающие высокую точность и оперативность размерного контроля [2]. Примерами в разработке и серийном изготовлении оптических приборов и систем являются фирмы «Leica» (Швейцария), «Sokkia» (Япония), «Spectra-Precision» (Швеция), УОМЗ (Россия) [3]. Опыт показывает, что их использование в судостроении позволяет существенно повысить производительность труда и качество постройки судов.

Приемлемые габаритные размеры и масса электронных тахеометров, так же как и относительно невысокие цены, позволяют использовать их при выполнении разметочных и проверочных работ в сборочно-сварочном и корпусостроительном производствах. Двухосевой компенсатор постоянно контролирует положение прибора в пространстве. Конструктивная защита от попадания влаги и пыли дает возможность эксплуатировать прибор в условиях производства.

На рис. 1 в качестве примера изображен тахеометр 3Та5Р Уральского оптико-механического завода (Россия).

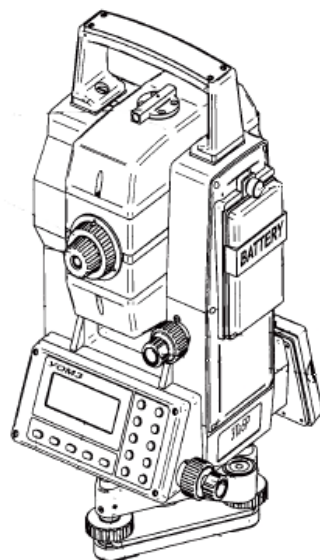


Рис. 1. Внешний вид тахеометра 3Та5Р

Одна из главных частей тахеометра – визирная труба. Она закреплена с возможностью вращения вокруг горизонтальной оси на столе. Стол вращается вокруг вертикальной оси. Перед измерениями тахеометр устанавливают на треногу. Установленный на треногу прибор юстируют. Юстировка состоит в ориентировании оси вращающегося стола тахеометра точно в зенит. Это выполняется последовательным использованием круглого и цилиндрического уровней тахеометра. Тахеометр проводит измерения в полярной системе координат (рис. 2).

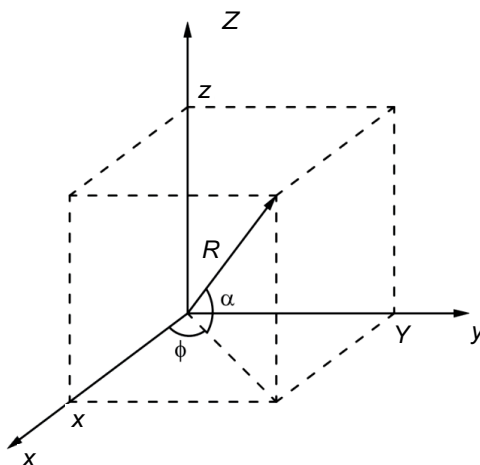


Рис. 2. Система координат, измеряемая тахеометром

Тахеометр снабжен высокоточными электронными датчиками измерений вертикального α и горизонтального ϕ углов. Дальность R от точки размещения тахеометра до марки, на которую наведена визирная труба, определяется лазерным дальномером.

Тахеометр снабжен внутренним вычислительным устройством. Это устройство может пересчитывать координаты из полярной системы координат (ϕ, α, R) в прямоугольную (X, Y, Z) .

После определения координат точек объекта судна в локальной системе координат тахеометра следует установить взаимосвязь этой системы с системой координат объекта и пересчитать измеренные координаты точек в систему координат объекта.

Объектная координатная система

Чтобы определить тахеометром локальную систему координат, его размещают в точке O (рис. 3), затем выставляются вертикальная и горизонтальные оси, которые имеют произвольные ориентирования.

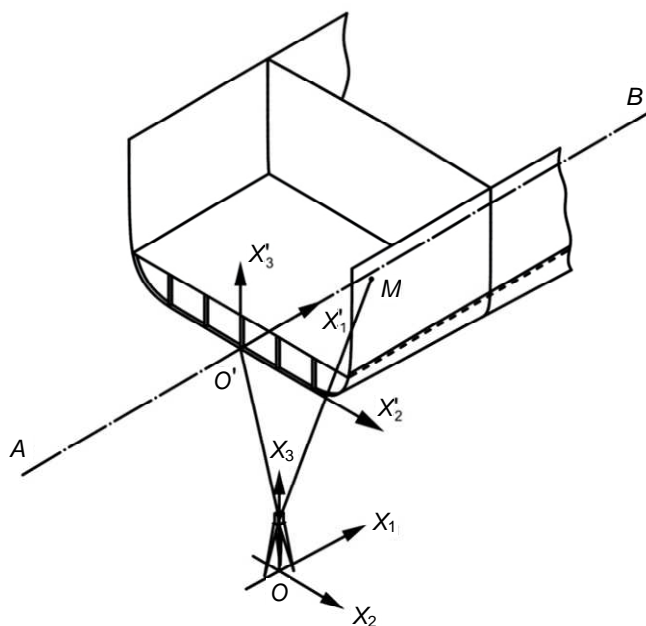


Рис. 3. Схема измерения координат точек конструкций судна тахеометром

Таким образом, векторы \vec{e}_1 и \vec{e}_2 (рис. 4) системы O задают горизонтальную плоскость, вектор \vec{e}_3 – это вертикаль.

При формировании корпуса судна на стапеле можно задать объектную систему координат следующим образом:

- 1) наметить на собираемом объекте ось двумя марками в точках A и B (рис. 4);
- 2) далее тахеометром измеряют координаты этих двух марок.

За одну из осей X_1' (см. рис. 3) объектной системы координат принимается линия, соединяющая марки на оси судна, A и B . Через эту ось проводится вертикальная плоскость. Располагаяем начало координат на одной из марок. Из начала координат проводим перпендикуляр к вертикальной плоскости. Это будет вторая ось X_2' , которая лежит точно в горизонтальной плоскости.

Третью ось X_3' зададим как перпендикуляр к плоскости, образованной осями X_1' и X_2' . Отметим, что ось X_1' – приближенная вертикаль, т. е. вертикаль с точностью до той степени, с которой мы выставили в горизонтальной плоскости ось судна. Это означает, что корпус судна будет собираться без крена на бок и с легким дифферентом на нос или корму, в соответствии с профилем стапельной площадки при сборке на наклонном стапеле.

Пересчет координат из локальную систему O в объектную координатную систему O'

Этот пересчет задается способом построения объектной системы координат. Ниже приведен пример построения объектной системы координат, заданной осью объекта, как описано выше.

Имеется локальная система координат O . На построечном месте мы определяем ось AB будущего объекта (судна) (рис. 4). В точках A и B помещаем марки и тахеометром определяем координаты точек A и B в локальной системе координат тахеометра. Координаты точек A и B в локальной системе O есть $X_{1A}, X_{2A}, X_{3A}, X_{1B}, X_{2B}, X_{3B}$.

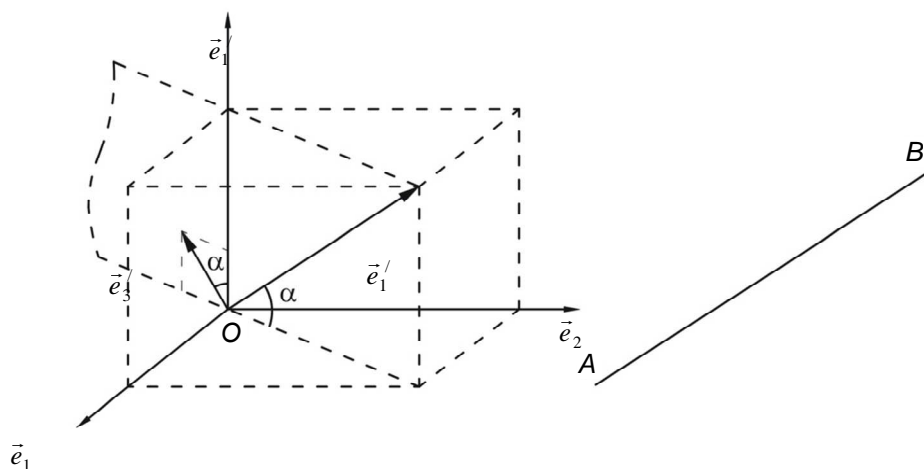


Рис. 4. Построение объектной системы координат

Обозначим через O' связанную с судном объектную систему координат, которую мы будем строить.

Направим орт \vec{e}_1' системы O' по оси AB . Тогда для проекций \vec{e}_1' на осях $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ системы O можно записать [4]:

$$\begin{aligned} (\vec{e}_1', \vec{e}_1) &= \frac{x_{1B} - x_{1A}}{\sqrt{(x_{1B} - x_{1A})^2 + (x_{2B} - x_{2A})^2 + (x_{3B} - x_{3A})^2}}, \\ (\vec{e}_1', \vec{e}_2) &= \frac{x_{2B} - x_{2A}}{\sqrt{(x_{1B} - x_{1A})^2 + (x_{2B} - x_{2A})^2 + (x_{3B} - x_{3A})^2}}, \\ (\vec{e}_1', \vec{e}_3) &= \frac{x_{3B} - x_{3A}}{\sqrt{(x_{1B} - x_{1A})^2 + (x_{2B} - x_{2A})^2 + (x_{3B} - x_{3A})^2}}. \end{aligned}$$

Проведем плоскость через оси \vec{e}_1' и \vec{e}_3 .

Вспомним, что ось \vec{e}_3 всегда направлена строго вертикально. Ось \vec{e}_3' построим как лежащую в этой вертикальной плоскости перпендикулярно к оси \vec{e}_1' . Ось \vec{e}_2' будем строить как нормаль к этой плоскости.

Из рис. 4 следует:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \sqrt{(\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_1)^2 + (\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_2)^2}, \\ \sin \alpha &= \pm \sqrt{1 - (\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_1)^2 + (\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_2)^2}, \end{aligned}$$

где α – угол между \vec{e}_3' и \vec{e}_3 .

Знак «+» у корня $\cos \alpha$ выбран потому, что вектор \vec{e}_1' лежит близко к горизонтальной плоскости; знак «+» у корня $\sin \alpha$ выбираем, если $x_{3B} - x_{3A} \geq 0$, «-» – если $x_{3B} - x_{3A} < 0$.

Для проекций вектора \vec{e}_3' на оси локальной системы O можно записать:

$$\begin{aligned}(\vec{e}_3' \cdot \vec{e}_3) &= \cos \alpha = \sqrt{(\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_1)^2 + (\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_2)^2}, \\(\vec{e}_3' \cdot \vec{e}_2) &= -(\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_2) \operatorname{tg} \alpha, \\(\vec{e}_3' \cdot \vec{e}_1) &= -(\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_1) \operatorname{tg} \alpha.\end{aligned}$$

Для проекций вектора \vec{e}_2' на оси локальной системы O можно записать:

$$\begin{aligned}(\vec{e}_2' \cdot \vec{e}_3) &= 0, \\(\vec{e}_2' \cdot \vec{e}_2) &= \cos \beta, \\(\vec{e}_2' \cdot \vec{e}_1) &= -\sin \beta, \\ \sin \beta &= \frac{(\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_2)}{\sqrt{(\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_2)^2 + (\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_1)^2}}, \\ \cos \beta &= \frac{(\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_1)}{\sqrt{(\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_2)^2 + (\vec{e}_1' \cdot \vec{e}_1)^2}},\end{aligned}$$

где β – угол между \vec{e}_2' и \vec{e}_2 .

Таким образом, у нас имеются проекции всех векторов – $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3, \vec{e}_1', \vec{e}_2', \vec{e}_3'$ – друг на друга.

Примем координаты точки A в локальной системе координат O за начало координат системы O' .

Тогда координаты точки M в объектной системе $x_{1M}', x_{2M}', x_{3M}'$ выражаются через координаты точки M в локальной системе O x_{1M}, x_{2M}, x_{3M} (рис. 5) следующим образом:

$$\begin{aligned}x_{1M}' &= (x_{1M} - x_{1A})(\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1') + (x_{2M} - x_{2A})(\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_1') + (x_{3M} - x_{3A})(\vec{e}_3 \cdot \vec{e}_1'), \\x_{2M}' &= (x_{1M} - x_{1A})(\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2') + (x_{2M} - x_{2A})(\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_2') + (x_{3M} - x_{3A})(\vec{e}_3 \cdot \vec{e}_2'), \\x_{3M}' &= (x_{1M} - x_{1A})(\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_3') + (x_{2M} - x_{2A})(\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_3') + (x_{3M} - x_{3A})(\vec{e}_3 \cdot \vec{e}_3').\end{aligned}$$

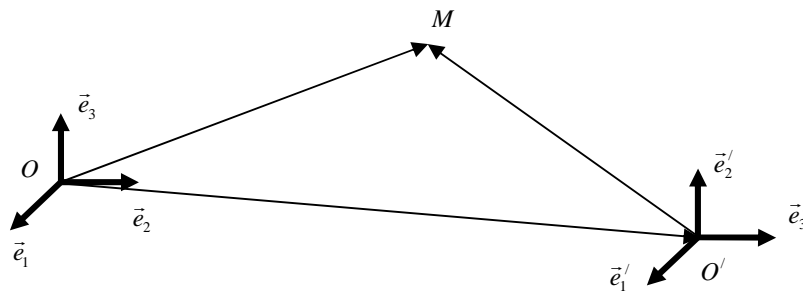


Рис. 5. Точка M в локальной и объектной системах координат

Так как ось AB параллельна, но в общем случае не совпадает с осью судна на чертеже, то, замерив координаты известной точки и сравнив их с теоретическими на чертеже, получим окончательную привязку измеряемых координат и теоретических как

$$\begin{cases} x''_{1M} = x'_{1M} - c_1, \\ x''_{2M} = x'_{2M} - c_2, \\ x''_{3M} = x'_{3M} - c_3, \end{cases}$$

где c_1, c_2, c_3 – величины сдвига по координатам в объектной системе.

В итоге фактическая модель контролируемой конструкции сопоставляется с теоретической моделью, а пересчитанные фактические координаты точек сравниваются с исходными (плазовыми) из математической модели корпуса судна по формулам:

$$\Delta_1 = x_1^{\text{факт}} - x_1^{\text{теор}},$$

$$\Delta_2 = x_2^{\text{факт}} - x_2^{\text{теор}},$$

$$\Delta_3 = x_3^{\text{факт}} - x_3^{\text{теор}},$$

где индексы *факт* и *теор* соответствуют фактическим и плазовым данным судна.

По этим результатам, вместе с информацией о допускаемых отклонениях, формы и положения конструкций, можно сделать вывод о погрешностях изготовления или положении конструкции при формировании корпуса судна.

На рис. 6 изображена укрупненная блок-схема измерительной системы для судового корпусостроения на основе применения лазерных тахеометров. Эта система позволяет быстро получить данные фактически прямо на месте выполнения измерения в реальном времени.



Рис. 6. Блок-схема измерительной системы для судового корпусостроения на основе лазерных тахеометров

По сравнению с традиционными инструментами измерений, такими как металлические рулетки и метры, шланговые уровни, шнуровые отвесы, точность измерений существенно повышается. Имеется и ряд других преимуществ.

Заключение

Как видно из вышеизложенного, внедрение новых измерительных средств позволит повысить точность и информативность измерений и сократить время, необходимое для проверочных работ при сборке секций и корпусов судов. Результаты сравнения с традиционными методами измерений в судостроении будут получены после накопления практических данных. Но практика мирового судостроительного производства показывает, что применяемые бесконтактные методы измерения координат объектов на основе оптических измерительных систем позволяют повысить производительность труда и конкурентоспособность верфей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Изаренков О. В.* Совершенствование методов проверочных работ на основе применения оптико-электронных измерительных приборов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.04. – СПб., 1999. – 23 с.
2. *Логачев С. И., Чугунов В. В., Горин Е. А.* Мировое судостроение: современное состояние и перспективы развития. – СПб.: МорВест, 2009. – 544 с.
3. *Гаврилюк Л. П.* Инновационные метрологические решения в судостроении // Вестн. технологии судостроения и судоремонта. – 2009. – № 17. – С. 102–105.
4. *Беклемишев Д. В.* Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учеб. для вузов. – М.: Физматлит, 2005. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 29.06.2011

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Блащук Владимир Николаевич – ООО «КНРГ-управление», Астрахань; канд. физ.-мат. наук; зам. директора по инжинирингу – управляющий директор; тел.: 8 906 455 29 92.

Blashchuk Vladimir Nickolaevich – "CNRG-Management" LLC, Astrakhan; Candidate of Physical-Mathematical Science; Deputy Director in Engineering – Managing Director; tel. 8 906 455 29 92.

Бунов Игорь Анатольевич – ООО «КНРГ-проекты», Астрахань, Центральная служба качества; инспектор контроля качества; тел.: 8 905 360 83 83.

Bunov Igor Anatolievich – "CNRG-Projects" LLC, Astrakhan, Central Office of Quality; Quality Control Inspector; tel. 8 905 360 83 83.

Хоанг Шон Минь – Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»; тел.: 8 (8512) 614-166.

Hoang Son Minh – Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department "Shipbuilding and Energetic Complexes of Sea Technological Equipment"; tel. 8 (8512) 614-166.

Лубенко Владимир Николаевич – Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники»; тел.: 8 (8512) 614-190.

Lubenko Vladimir Nickolaevich – Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Science, Professor; Professor of the Department "Shipbuilding and Energetic Complexes of Sea Technological Equipment"; tel. 8 (8512) 614-190.