

## Роль цифровых измерительных технологий в современном судостроении

Сегодня большинство отечественных предприятий судостроения имеют весьма низкую производительность труда и высокую трудоемкость производственных процессов (в 3-5 раз выше, чем за рубежом) [1]. Для увеличения их производительности необходим качественно иной уровень технологической подготовки производства, включая повышение степени автоматизации производственных процессов. Одним из направлений развития судостроительной отрасли, способных существенно изменить облик и функционирование судостроительного производства, является цифровизация, которая должна обеспечить переход на новый уровень проектирования и постройки кораблей и судов, в частности исключая использование документации на бумажных носителях и обеспечивающий возможность выдачи данных для производства (в первую очередь для станков с ЧПУ) на основе проектных 3D-моделей, а также математических моделей технологических процессов ([2], [3]).

Одним из основных требований, предъявляемых в настоящее время к судостроению, является применение современных методов сквозного проектирования и управления жизненным циклом судна. В перспективе необходим переход на 6D-проектирование (отличается от 3D-проектирования тем, что к твердотельной проработке конструкций добавляется еще время – в виде различных

вариантов календарно-сетевого планирования процесса постройки, оборудование – данные о требуемом оснащении производства, конфигурации, комплектации и вариантах поставки необходимых станков и технологической оснастки, а также остальные ресурсы – людские, финансовые и другие), освоение и широкое внедрение технологий и методов крупноблочного (модульного) строительства, а также автоматизация производственных процессов.

Однако для модернизации судостроительного производства необходимо преодоление ряда барьеров, в первую очередь технологического. Внедрение сквозного проектирования кораблей (сквозных цифровых технологий) и крупноблочного метода постройки кораблей и судов невозможно без повышения точности изготовления и монтажа судовых систем и конструкций, а следовательно, и повышения качества измерений трехмерных параметров элементов и систем корабля, включая получение сведений о фактических размерах изготовленного оборудования в интересах реверсного проектирования. Под повышением качества следует понимать как повышение точности измерений, так и снижение их трудоемкости. Трудоемкость контрольно-измерительных операций при строительстве корпуса судна может составлять до 30% от всех сборочных работ [4]. Общее число измерений при этом может достигать 5000 и более [5].



В свою очередь, судокорпусные работы занимают до 40-45% от общей трудоемкости постройки судна. При этом цифровизация отдельных технологических процессов, например механомонтажа, в значительной степени завязана на метрологическое обеспечение производства и не может существенно измениться без развития технологии контрольно-измерительных работ.

Традиционно используемые в судостроении средства измерений имеют относительно невысокую точность, не отвечающую современным требованиям, предъявляемым при модульном строительстве, а их применение является весьма трудоемким. Существенным моментом является также то, что использование средств измерений невысокой точности является одной из основных причин появления погрешностей формы, размеров и пространственного положения деталей и узлов судна и приводит к большому объему пригоночных работ (до 40% от общей трудоемкости корпусных работ [6]). Пригоночные работы в большинстве случаев проводятся вручную “по месту”, что затрудняет планирование и оптимизацию производственных процессов. Это свидетельствует о высокой актуальности вопросов точности измерений в судостроении в целом.

Следует также отметить, что повышение требований к точности изготовления, сборки и монтажа всех ключевых узлов и деталей выпускаемых изделий является общемировой тенденцией, поскольку от этого напрямую зависят их качество и конкурентоспособность. Известно, что каждые десять лет допуски на линейные размеры изделий машиностроения ужесточаются на 1-2 квалитета, то есть сокращаются в 1,6-2,5 раза [7].

Опыт судостроения последних десятилетий показывает, что повышение точности измерений (а следовательно, повышение точности и сокращение сроков изготовления деталей и узлов кораблей и судов) может быть обеспечено за счет применения современных оптоэлектронных приборов – лазерных трекеров, тахеометров, сканеров и проекторов ([5], [8], [9], [10]). Данные приборы имеют общепромышленное назначение и успешно используются во многих отраслях (авиационной, ракетной, в автомобилестроении, станкостроении, энергетике) для точного измерения габаритных параметров различных изделий. Указанные измерительные системы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с классическими средствами измерений линейно-угловых величин, а именно такими, как [11]:

- ▶ повышение точности выполнения основных технологических процессов, в том числе изготовления, сборки и монтажа изделий;
- ▶ возможность существенного снижения объема и трудоемкости пригоночных работ;
- ▶ создание измерительной основы для компьютерного моделирования и внедрения сквозных цифровых технологий за счет получения результатов измерений в цифровом виде с возможностью их обработки в различных CAD-системах;
- ▶ метрологическое обеспечение модульно-агрегатных методов монтажа оборудования и т.д.

Последующая обработка координат контрольных точек, полученных в ходе измерений, дает возможность

получить (при наличии соответствующего программного обеспечения) любые данные о геометрии объекта – сечения, оси, плоскости, огибающие и т.д., а также находить фактические расстояния и углы между любыми элементами, что зачастую невозможно достичь традиционными методами. Это позволяет формировать обоснованные рекомендации по доработке изделий по результатам изготовления головных (опытных) образцов изделий.

Таким образом, цифровые измерительные технологии играют одну из ключевых ролей в цифровом преобразовании судостроительного производства.

Сегодня в России темпы внедрения цифровых измерительных технологий в судостроении являются недостаточными и охватывают только отдельные техпроцессы. Текущее положение дел может быть охарактеризовано следующим образом:

- ▶ разработаны общая методология и ряд нормативных документов по применению трехмерных средств измерений при выполнении работ в различных видах судостроительного производства, включая механомонтажное;
- ▶ отработаны и регулярно внедряются на уровне отдельных техпроцессов методы размерного контроля на базе цифровых трехмерных средств измерений зарубежного производства;
- ▶ накоплен существенный опыт использования цифровых трехмерных средств измерений при решении отдельных задач размерного контроля;
- ▶ отсутствует опыт разработки и внедрения сквозных цифровых технологий при постройке судов, в том числе полного охвата цифровыми технологиями контрольно-измерительных работ при механомонтаже.

В настоящее время АО “ЦТСС” проводит работу по нескольким направлениям для обеспечения задела по цифровизации судостроительного производства и широкого внедрения цифровых измерительных технологий при сборке и монтаже крупногабаритных насыщенных сборочно-монтажных единиц в виде функциональных модулей (в частности, судовых энергетических установок, в том числе ЯЭУ), а также специальных комплексов и иного вспомогательного оборудования.

Так, например, по заказу АО “ОКБМ “Африкантов” силами АО “ЦТСС” была выполнена работа по разработке методической базы для использования бесконтактных оптических методов контроля формы и размеров оборудования и опытному внедрению виртуальных методов выполнения контрольной сборки ЯЭУ, в том числе разработан руководящий документ РД ГКЛИ.3320-265-2017 “Спецоборудование. Методы бесконтактного оптического контроля формы и размеров оборудования и выполнения виртуальной контрольной сборки” [12]. Данная работа позволяет перейти от сложных и продолжительных по времени физических контрольных выкладок конструкций ЯЭУ к виртуальной цифровой сборке с выдачей обоснованных рекомендаций на доработку изготовленных частей ЯЭУ для обеспечения их собираемости. В настоящее время ведется работа по отработке технологии виртуального цифрового монтажа ЯЭУ на носителе.

Целью осуществления виртуальной контрольной сборки является обеспечение собираемости изделия

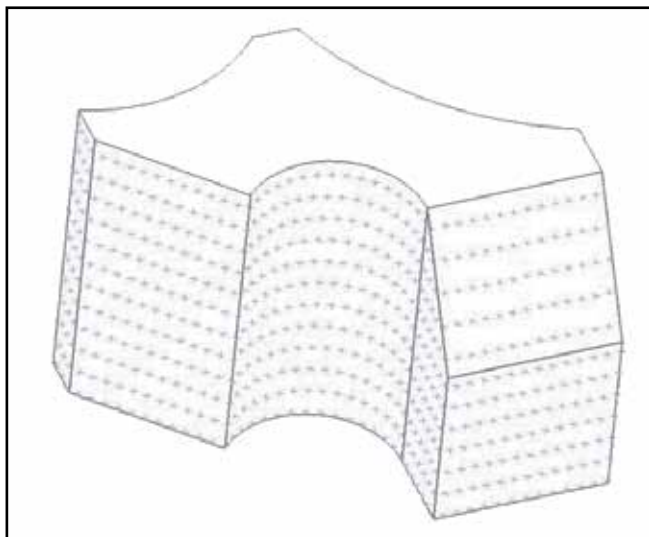


Рис. 1. Сеть контрольных точек на вертикальных поверхностях конструкторской модели закладного блока

без проведения этапа физической контрольной сборки. Результатом виртуальной сборки является адекватная цифровая модель собранного изделия, учитывающая все наиболее существенные геометрические параметры конкретного экземпляра изделия.

Виртуальная контрольная сборка позволяет решить следующие задачи:

- ▶ дистанционная оценка соответствия изготовленных деталей и узлов изделия требованиям рабочей конструкторской документации;
- ▶ оценка собираемости конкретного экземпляра изделия с обеспечением заданных требований по точности сборки;
- ▶ обоснование решений о необходимости доработки конкретных деталей или узлов изделия для обеспечения его собираемости;
- ▶ выбор мест доработки деталей и узлов, расчет параметров обработки и размеров вводимых деталей-компенсаторов;
- ▶ выдача обоснованных рекомендаций по доработке деталей и узлов;
- ▶ выдача обоснованных рекомендаций по осуществлению конечной физической сборки конкретного экземпляра изделия;
- ▶ оценка качества изготовления деталей и узлов, а также сборки изделия на основе их сравнения с исходными (проектными) 3D-моделями.

Разработанный в результате проведенных работ руководящий документ устанавливает следующий порядок осуществления виртуальной контрольной сборки:

- ▶ организация-проектант изделия разрабатывает исходные (проектные) 3D-модели изделия, его узлов и деталей;
- ▶ 3D-модели, электронные паспорта и координаты контрольных точек и установочных рисков деталей и узлов изделия передаются предприятиям-изготовителям для организации измерений;
- ▶ квалифицированными специалистами проводятся измерения по месту изготовления объектов. Результаты измерений обрабатываются и оформляются установленным порядком;

- ▶ поступающие от предприятий-изготовителей материалы обрабатываются, и на основании данных о геометрических параметрах изготовленных объектов производится виртуальная контрольная сборка и оценка собираемости конкретного экземпляра изделия с обеспечением заданных требований по точности сборки;
- ▶ организацией-проектантом принимаются обоснованные решения о допуске оборудования к монтажу или о необходимости доработки конкретных деталей или узлов изделия для обеспечения его собираемости. Осуществляется назначение участков и параметров доработки деталей и узлов;
- ▶ данные по необходимой доработке передаются на предприятия, изготавливающие соответствующие части изделия, где в соответствии с указанными рекомендациями осуществляется доведение обозначенных объектов до требуемого уровня с повторным размерным контролем доработанных объектов;
- ▶ при необходимости производится повторная виртуальная контрольная сборка.

Исходная модель изделия должна содержать все объекты (узлы, детали), подлежащие контролю, на модель каждого объекта должна быть нанесена сеть контрольных точек (рис. 1), необходимых для оценки его геометрических параметров, для каждого объекта должно быть задано пространственное положение базовых поверхностей и отметок, включая установочные риски.

Степень детализации объектов при разработке 3D-модели определяется требованиями обеспечения собираемости (геометрические параметры поверхностей, не участвующих в сопряжении объектов, могут быть упрощены). Предварительно должны быть выявлены основные поверхности объектов, геометрия которых критическим образом влияет на собираемость изделия, и поверхности, которые могут быть выполнены в рамках общих допусков. В общем случае плотность наносимой сети контрольных точек зависит от степени важности контролируемой поверхности. 3D-модели и сопровождающая их документация, используемые для виртуальной контрольной сборки, должны учитывать и раскрывать все факторы, оказывающие существенное влияние на точность сборки, в том числе допуски на геометрические размеры поверхностей, требования к их взаимному расположению и т.д.

Каждой контрольной точке присваивается уникальный идентификатор, позволяющий впоследствии произвести поиск и прямое сравнение положения двух контрольных точек, расположенных на сопрягаемых объектах в месте контролируемого зазора. Идентификатор также дает возможность однозначного определения пространственного положения контрольной точки и ее принадлежности к поверхности какого-либо объекта. Все объекты, подлежащие контролю, получают свой уникальный порядковый номер, который может состоять из любой двух-трехзначной последовательности букв латинского алфавита и цифр. Аналогичным образом нумеруются все секущие плоскости, используемые для получения контрольных точек. Каждая поверхность объекта измерений получает литеру, присваиваемую на



этапе создания контрольных точек. Данные контрольных точек являются основой для составления электронного паспорта объекта измерений.

Измерения геометрических параметров изготовленных изделий с целью их сопоставления с данными теоретических 3D-моделей могут осуществляться с использованием таких средств измерений, как лазерный сканер и лазерный трекер.

Результатом обработки данных измерений является действительная 3D-модель изготовленного объекта с определенными величинами отклонений ее поверхностей от проектных (рис. 2). Величины отклонений в цифровом виде также заносятся в электронный паспорт объекта измерений.

Разработанный руководящий документ предусматривает, что при осуществлении виртуальной контрольной сборки на основании данных измерений могут быть использованы следующие методы:

- ▶ метод виртуальной установки реальных деталей в штатное положение, предусмотренное РКД. При этом производится оценка соответствия параметров соединения изготовленных объектов требованиям РКД, определение критических отклонений, способных повлиять на собираемость изделия, и выдача рекомендаций по их доработке;
- ▶ метод перебора различных вариантов относительного виртуального расположения реальных деталей собираемого изделия и выбор расположения, обеспечивающего минимальный (рациональный) объем доработок. При выполнении виртуальной контрольной сборки в общем случае необходимо выбирать такое относительное положение узлов и деталей внутри изделия, чтобы они в максимально возможной степени взаимно компенсировали погрешности изготовления друг друга.

В случае использования первого (базового) метода виртуальная контрольная сборка производится на основании данных, представленных в электронных паспортах изделий. При этом предприятие-проектант, осуществляющее этап виртуальной сборки, должно произвести анализ и выработать комплекс мероприятий, необходимых для успешного монтажа всех элементов, входящих в изделие. Контроль зазоров между двумя сопрягаемыми поверхностями осуществляется в этом случае по значениям отклонений, представленных в двух электронных паспортах объектов. Величина фактического зазора равна разнице суммы двух отклонений и теоретического зазора (таблица).

При использовании второго метода (с рациональным уменьшением пригоночных работ) создается фактическая CAD-модель собираемого изделия в специализированном программном обеспечении из объектов, геометрия которых определяется интерполяцией полученных в процессе обработки измерений координат контрольных точек. Затем между объектами модели создаются взаимосвязи, по-

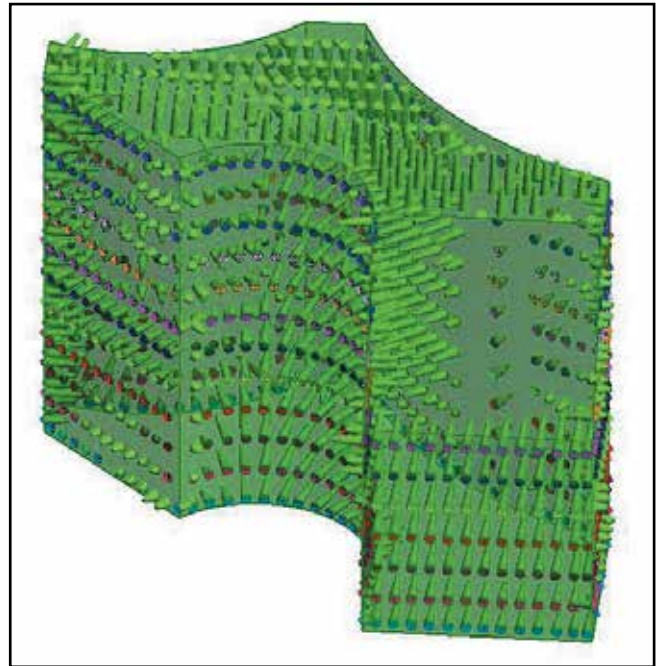


Рис. 2. Пример графического отображения отклонений контрольных точек относительно теоретической модели после совмещения системы координат данных измерений с системой координат теоретической модели

зволяющие вносить корректировки в положение объектов с определением зазоров и возможных пересечений с поверхностями своего окружения, осуществляется виртуальная контрольная сборка с перебором всех вариантов соединения для всех объектов по упрощенной методике расчета (в сборке участвуют только наиболее габаритные и ответственные элементы). По результатам расчетов определяется небольшое количество (не более трех) приемлемых вариантов виртуального изделия, после чего для всех имеющихся в базе данных деталей проводится виртуальная сборка изделия, определяются требуемые выходные геометрические параметры качества сборки для каждого варианта и производится выбор варианта, минимизирующего объем доработок.

Внедрение виртуальной контрольной сборки на основе результатов, полученных предприятиями-изготовителями изделий и оборудования ЯЭУ при проведении изме-

Таблица. Фактические отклонения от проектной модели в контрольных точках (пример)

Идентификатор	Отклонение, мм	Идентификатор	Отклонение, мм
85_Н_68_А_17_31	-2,3	85_Н_68_А_20_28	-0,7
85_Н_68_А_17_32	-0,1	85_Н_68_А_20_29	+2,6
85_Н_68_А_17_33	+0,8	85_Н_68_А_21_26	-1,7
85_Н_68_А_18_29	-3,3	85_Н_68_А_21_27	-1,2
85_Н_68_А_18_30	-2,4	85_Н_68_А_21_28	+1,5
85_Н_68_А_18_31	+1,2	85_Н_68_А_22_25	+2,9
85_Н_68_А_18_32	-1,3	85_Н_68_А_22_26	+0,3
85_Н_68_А_19_29	-0,6	85_Н_68_А_22_27	+0,5
85_Н_68_А_19_30	-1,0	85_Н_68_А_23_24	-1,0
85_Н_68_А_19_31	-1,4	85_Н_68_А_23_25	+0,9

рений цифровыми измерительными системами, позволит значительно снизить объем и трудоемкость пригоночных работ, а также отказаться от технологически сложной и затратной процедуры контрольной сборки основного оборудования ЯЭУ. Результаты работы также могут быть широко использованы в механомонтажном производстве в судостроительной отрасли, а также в других отраслях промышленности при решении сложных задач сборки и монтажа крупногабаритного оборудования.

Представленная выше разработка особенно перспективна для изготовления блоков БЗ, устанавливаемых вокруг реакторов типа РИТМ-200, РИТМ-400. Блоки БЗ имеют сложную геометрическую конфигурацию – согласно требованиям проектанта, они должны точно сопрягаться друг с другом, образуя надежную защиту от ионизирующих излучений. Их точное изготовление становится возможным при условии использования современных средств контроля и специального станочного оборудования.

Основными причинами отставания в применении современных средств измерений в отечественном судостроении являются:

- ▶ недостаток бюджетных средств на обновление нормативной базы в части использования высокоточных средств измерений при решении типовых задач размерного контроля;
- ▶ невысокий процент и слабая динамика технического переоснащения предприятий отрасли в части наличия высокоточных средств измерений вследствие высокой стоимости последних;
- ▶ практически полное отсутствие отечественных цифровых высокоточных приборов и программного обеспечения – подавляющее большинство средств измерений и программного обеспечения являются иностранными. Так, например, на рынке отсутствуют отечественные лазерные измерительные системы, такие как трекары и сканеры;
- ▶ дефицит квалифицированных специалистов, способных эксплуатировать современные высокоточные средства измерений.

Указанные факторы представляют собой существенные препятствия для дальнейшего развития отрасли, преодоление которых требует совместной целенаправленной деятельности государственных и частных структур, включая госкорпорации.

## Выводы

1. Цифровые измерительные технологии играют одну из ключевых ролей в цифровом преобразовании судостроительного производства.
2. Метрологическое обеспечение производства в ближайшем будущем должно быть существенно модернизировано за счет широкого (сквозного для большинства этапов жизненного цикла судов) внедрения в контрольно-измерительные операции цифровых лазерных и оптикоэлектронных средств измерений с целью повышения точности контроля, получения результатов измерений в цифровом виде, выдачи обоснованных рекомендаций по корректировке кон-

структорской документации и доработке изделий по результатам их изготовления и измерений.

3. Для широкого внедрения цифровых измерительных технологий в судостроении необходима целенаправленная работа ответственных государственных органов по устранению причин отставания России от зарубежного уровня развития цифровых метрологических комплексов.

**Н. И. Герасимов, д.т.н.,  
П. Л. Лямин, к.т.н.,  
А. В. Красильников, к.т.н.,  
АО «ЦТСС»**

## Литература

1. Концепция развития кластера судостроения в Санкт-Петербурге (электронный ресурс): <http://gov.spb.ru/static/writable/ckeditor/uploads/2013/02/07/sudostroenie.pdf>
2. Проект «Цифровая верфь» (электронный ресурс): <http://technet-nti.ru/article/proekt-cifrovaya-verf>
3. Дмитриев Н. Д., Цифровая трансформация судостроения // Стратегии бизнеса – № 10 (66), 2019 – с. 15-18.
4. Боронина Н. П., Исследование точности резки листовых деталей корпусов судов с помощью тахеометра / Н. П. Боронина, Нгуен Чунг Ань, В. Н. Лубенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология – Выпуск № 2, 2014 – с. 7-13.
5. Лубенко В. Н., Анализ возможности применения тахеометров для контроля проверочных работ при сборке корпусов судов / В. Н. Лубенко, С. С. Трофимова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология – Выпуск № 1, 2012 – с. 25-29
6. Александров В. Л., Точность в судовом корпусостроении / В. Л. Александров, Л. Ц. Адлерштейн, В. В. Макаров, В. Ф. Соколов, Н. Я. Титов. – СПб.: Судостроение, 1994. – 172 с.
7. Григорьев С. Н., Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства / С. Н. Григорьев, Д. А. Мастеренко, В. И. Телешевский, П. Н. Емельянов // Измерительная техника. – № 11, 2012. – с. 56-59.
8. Изаренков О. В., Совершенствование методов проверочных работ на основе применения оптико-электронных измерительных приборов: автореф. дис. к.т.н.: 05.08.04. – СПб., 1999. – 23 с.
9. Гаврилюк Л. П., Метрология трехмерных измерений в судостроении / Л. П. Гаврилюк. – СПб.: АО «ЦТСС», 2016. – 208 с.
10. Гаврилюк Л. П., Общие основы технологии монтажа судового оборудования / Л. П. Гаврилюк. – СПб.: ОАО «ЦТСС», 2012. – 248 с.
11. Герасимов Н. И. Основные направления повышения эффективности механомонтажных производств современного судостроения / Н. И. Герасимов, В. В. Лисицкий, А. В. Красильников и др. // Судостроение, № 1 (854) – СПб.: АО «ЦТСС». – 2021. – с. 32-38.
12. Спецоборудование. Методы бесконтактного оптического контроля формы и размеров оборудования и выполнения виртуальной контрольной сборки: РД ГЛИ.3320-265-2017: утв. АО «ЦТСС» 08.11.2018, согл. НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» 30.10.2018, АО «ЦКБ МТ «Рубин» 02.11.2018, АО «СПМБМ «Малахит» 07.11.2018: введ. в действие с 09.11.2018. – СПб.: АО «ЦТСС», 2018. – 51 с.

# XXI

XXI Международная научно-практическая конференция

# МОРИНТЕХ- ПРАКТИК 2021

«Информационные технологии в судостроении»

в рамках деловой программы

X Международного военно-морского салона МВМС-2021



23 июня  
2021 года

Санкт-Петербург,  
ул. Корабельная, д.6  
ПАО СЗ «Северная верфь»

Тел.: +7 (812) 935-3248  
+7 (921) 878-9509

Организаторы:



Информационный центр  
**MARINCONF**

<http://www.marinconf.ru/>

E-mail: [info@marinconf.ru](mailto:info@marinconf.ru)  
[www.marinconf.ru](http://www.marinconf.ru)

