

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕХАНОМОНТАЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ СУДОСТРОЕНИЯ

**Н.И. Герасимов, П.Л. Лямин, А.В. Красильников (Санкт-Петербург),
А.С. Русаков, Д.С. Невин, Л.Б. Соколова (Нижний Новгород)**

Сегодня одним из направлений развития судостроительной отрасли, способным существенно изменить облик и функционирование судостроительного производства, является постепенно нарастающая цифровизация последнего, которая должна обеспечить переход на новый уровень проектирования и постройки 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 (см., например, [1 – 2]).

Цифровизация судостроительного производства предполагает переход на качественно новый уровень по ряду направлений, в том числе, в части метрологического обеспечения производства и выполнения механомонтажных работ. При этом цифровизация процессов механомонтажного производства в значительной степени завязана на метрологическое обеспечение и не может существенно измениться без развития технологии контрольно-измерительных работ.

В настоящее время, несмотря на относительно высокую стоимость, все более широкое применение находит использование высокоточных цифровых лазерных и оптоэлектронных средств измерений для контроля формы и решения вопросов собираемости машиностроительных изделий. Данные измерительные системы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с классическими средствами измерений линейно-угловых величин, а именно:

- 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 САД-системах;
- метрологическое обеспечение модульно-агрегатных методов монтажа оборудования и т.д.

Последующая обработка координат контрольных точек, полученных в ходе измерений, даёт 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 получить традиционными методами. Это позволяет формировать обоснованные рекомендации по доработке изделий по результатам изготовления головных (опытных) образцов изделий.

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

- разработана 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 в судостроении на уровне отдельных технологических процессов методы размерного контроля на базе цифровых трехмерных средств измерений зарубежного производства;
- предприятиями отрасли накоплен существенный опыт использования цифровых трехмерных средств измерений при решении отдельных задач размерного контроля;
- опыт внедрения сквозных цифровых технологий при постройке судов, в том числе, сплошного охвата цифровыми технологиями контрольно-измерительных работ при механомонтаже отсутствует.

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 ядерной энергетической установки (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» [3]. 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 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 документацией;
- 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 на доработку 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 рисок деталей и узлов изделия передаются предприятиям-изготовителям для организации измерений;
- проводятся измерения по месту изготовления объектов, результаты измерений обрабатываются и оформляются установленным порядком;
- поступающие от предприятий-изготовителей материалы обрабатываются и по данным 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 на заказе 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-изготовители частей 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.

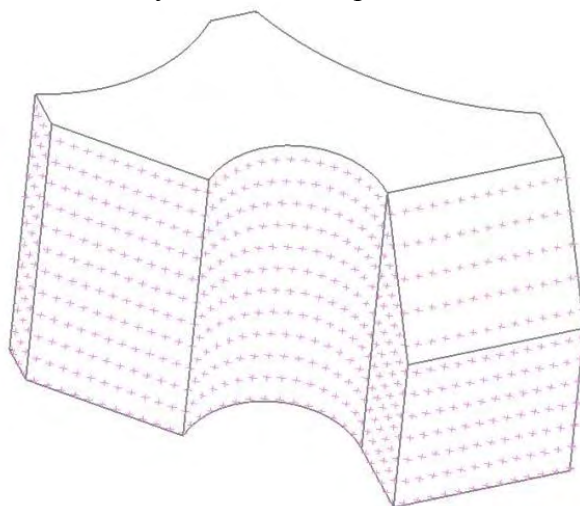


Рисунок 1 – Сеть контрольных точек на вертикальных поверхностях конструкторской модели закладного блока

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 ответственности контролируемой поверхности. 3D-модели и сопровождающая их документация, используемые для виртуальной

контрольной сборки, должны учитывать и раскрывать все факторы, значительно влияющие 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, принадлежности ее 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 сличения с данными теоретических 3D-моделей могут осуществляться с использованием следующих средств измерений:

- лазерный сканер;
- лазерный трекер.

Результатом обработки данных измерений является действительная 3D-модель изготовленного объекта с определенными величинами отклонений ее поверхностей от проектных (рис. 2).

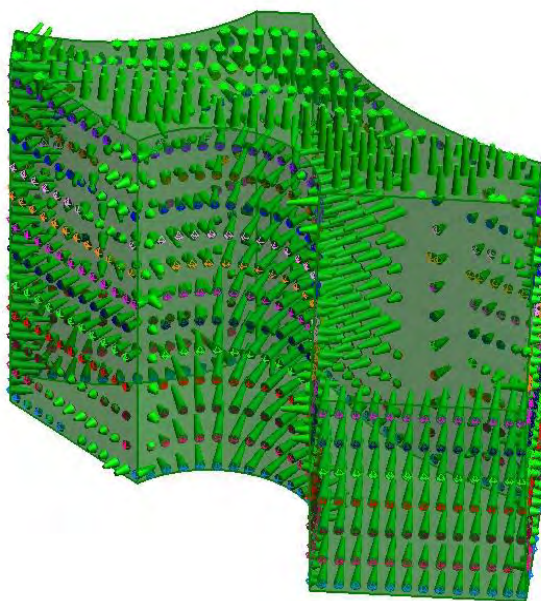


Рисунок 2 – Пример графического отображения отклонений контрольных точек относительно теоретической модели после совмещения системы координат данных измерений с системой координат теоретической модели

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 есть разница суммы двух отклонений и теоретического зазора (таблица 1).

Т а б л и ц а 1 – Фактические отклонения от проектной модели в контрольных точках (пример)

Идентификатор	Отклонение, мм	Идентификатор	Отклонение, мм
85_H_68_A_17_31	-2,3	85_H_68_A_20_28	-0,7
85_H_68_A_17_32	-0,1	85_H_68_A_20_29	+2,6
85_H_68_A_17_33	+0,8	85_H_68_A_21_26	-1,7
85_H_68_A_18_29	-3,3	85_H_68_A_21_27	-1,2
85_H_68_A_18_30	-2,4	85_H_68_A_21_28	+1,5
85_H_68_A_18_31	+1,2	85_H_68_A_22_25	+2,9
85_H_68_A_18_32	-1,3	85_H_68_A_22_26	+0,3
85_H_68_A_19_29	-0,6	85_H_68_A_22_27	+0,5
85_H_68_A_19_30	-1,0	85_H_68_A_23_24	-1,0
85_H_68_A_19_31	-1,4	85_H_68_A_23_25	+0,9

При использовании второго метода (с рациональным уменьшением пригоночных работ) создается фактическая САД-модель собираемого изделия в специализированном программном обеспечении из объектов, геометрия которых получена интерполяцией полученных в процессе обработки измерений координат контрольных точек. Затем между объектами модели создаются взаимосвязи, позволяющие 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 измерений 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 судостроения, а также других отраслях промышленности при решении сложных задач сборки и монтажа крупногабаритного оборудования.

Основными причинами отставания в применении современных средств измерений в отечественном судостроении, включая механомонтажные работы, 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 высокоточных приборов и программного обеспечения, подавляющее большинство средств измерений и программного обеспечения являются иностранными (например, на рынке отсутствуют отечественные лазерные измерительные системы, такие как трекары и сканеры);

- дефицит квалифицированных специалистов, способных эксплуатировать современные высокоточные средства измерений.

Выводы

1. Цифровые измерительные технологии могут быть широко и успешно использованы в механомонтажном производстве судостроения, а также других отраслях промышленности при решении сложных задач сборки и монтажа крупногабаритного оборудования.

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 оптико-электронных средств измерений с целью повышения точности контроля, получения результатов измерений в цифровом виде, выдачи обоснованных рекомендаций по корректировке конструкторской 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.

Литература

1. Проект «Цифровая верфь» (электронный ресурс). Режим доступа: <http://technet-nti.ru/article/proekt-cifrovaya-verf>.
2. **Дмитриев Н.Д.** Цифровая трансформация судостроения // Стратегии бизнеса. № 10 (66), 2019. С. 15-18.
3. Спецоборудование. Методы бесконтактного оптического контроля формы и размеров оборудования и выполнения виртуальной контрольной сборки [Текст]: РД ГКЛИ.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: ввод в действие с 09.11.2018. СПб.: АО «ЦТСС», 2018. 51 с.