

Формирование информации о технологических характеристиках объектов производства с использованием их аналитических методов описания в среде CAD/CAM систем

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Дан анализ способов передачи информации о размерах изделий, определены требования к электронным моделям сборки, аналитическим эталонам и портретам деталей, определен состав аналитического эталона изделия, а также состояние изделия на всех стадиях его жизненного цикла.

Ключевые слова: машинно-ориентированное производство, CAD/CAM системы, электронная модель сборочной единицы, аналитический эталон изделия, жизненный цикл изделия.

Введение

Последние два столетия развития машиностроения неразрывно связаны с использованием чертежа в качестве основного носителя конструкторской и технологической информации о выпускаемой продукции. В 1799 году математик и инженер Гаспар Монж сумел обобщить опыт производства пушек на французских заводах в своей работе «Geometrie descriptive», которая переводится как «Начертательная геометрия» [1]. Он сформулировал общий метод графического решения стереометрических задач с помощью плоских построений для «точного представления на чертеже, имеющем только два измерения, объектов трехмерных, которые могут быть точно заданы.

Начертательная геометрия, занимаясь разработкой графических методов отображения пространственных объектов, является последние 200 лет основным языком машиностроения и создала теоретические основы формирования чертежа. Он относится к основным конструкторским документам и содержит данные, необходимые для изготовления изделия и выполнения контроля [2]. Рассматривая информационные свойства чертежа, следует отметить его наглядность, поскольку он ориентирован на передачу информации от человека к человеку. Он достаточно информативен и лаконичен для производства простых деталей на универсальном оборудовании [3]. Однако реальные объекты трехмерны, а чертеж оперирует их плоскими (двумерными) проекциями. Поэтому идеальный (эталонный) образ объекта производства в виде трехмерной его модели восстанавливается уже в голове конструктора, технолога, рабочего и т.д. Этот эталонный образ объекта находится в непосредственной зависимости от образования, опыта и природных умственных способностей пользователя такой информации. Таким образом, у каждого субъекта процесса подготовки и производства изделия формируется свой трехмерный образ, что не способствует единому представлению объекта производства всеми участниками его жизненного цикла.

Кроме того, на чертеже реализованы два способа передачи информации о размерах изделий: плоскими проекциями, построенными в масштабе и системой постановки размеров. При втором способе числа над размерными линиями определяют величины всех геометрических элементов объекта производства в миллиметрах. Для преодоления этого противоречия принято правило, по которому плоские проекции чертежа служат лишь справочной информацией при восстанов-

лении образа объекта по значениям размеров.

Исключением является авиастроение (кораблестроение), где используются плазы для перенесения информации о формах и размерах на реальный объект [4, 5]. Плаз – это чертеж, выполненный на жестком носителе в масштабе 1:1, который является эталоном взаимного расположения элементов конструкции. Взаимоуязвленные между собой плазы, шаблоны, монтажные эталоны и калибры разъемов агрегатов являются жесткими носителями геометрических форм и размеров. С этих носителей информации размеры передаются рабочей оснастке. Качество информации при этом определяется точностью вычерчивания линий и ее передача, по сути, заключается в копировании линий. Плаз представляет собой модель форм и размеров агрегатов, деталей и сборочных единиц на языке начертательной геометрии. Поэтому производство, проводя плазовую увязку форм и размеров, использует не численное выражение размера, а графическое. Проверка соответствия реально полученной формы контура шаблона своей модели осуществляется путем прямого сравнения ее с плазом.

Такой комплекс мероприятий позволяет построить систему, в которой теоретический контур самолета становится фактически ее системой координат, что упрощает взаимную увязку элементов конструкции изделия и значительно повышается ее точность. Эта же система обеспечивает формирование соответствующей физической системы координат в условиях серийного авиастроительного производства передачей информации от плаза к шаблонам и далее с помощью эталонных и мастер-плит, инструментальных стендов и т.п. обеспечивается соответствие объекта производства его теоретической модели (плазу).

Таким образом, в качестве эталонов поверхностей используются их физические модели, копированием которых обеспечивается увязка всех последующих производственных процессов. Отсутствие теоретической эталонной модели геометрии объекта производства требует значительных временных затрат для их построения на этапе ТПП при формировании управляющих программ (УП) для изготовления сложнопрофильных деталей и оснастки. Кроме того, точность, объективность, трудоемкость и оперативность выполняемых процедур контроля далеко не всегда удовлетворяет требованиям современных регламентирующих документов.

Аналитический метод Декарта убедительно продемонстрировал преимущества описания геометрических объектов, когда у каждой кривой есть определяющее уравнение. Этот метод был взят на вооружение многими математиками, что привело к созданию аналитической геометрии.

Потребность изготовления машиностроением сложнопрофильных объектов, возникшая, например, в авиационной отрасли, привели к возникновению аппарата сплайновой геометрии [8]. Бурное развитие вычислительной техники позволило реализовать аналитический метод построения таких зависимостей, что привело к появлению CAD систем. Наиболее удачным описанием сложных форм объектов производства оказались параметрические сплайны NURBS (Non-uniform rational B-spline) [9], разработчиками которых являются французы Пьер Безье, инженер и математик из компании Рено и Поль де Кастельжо, сотрудник компании Ситроен [10, 11]. Их основное внимание было уделено точности описания геометрии объектов производства, надежности и простоте алгоритмов расчета. Кривые Безье легли в основу поверхностей Безье, которые соответствуют условиям формирования поверхностей объектов производства, что способствовало их применению во многих современных CAD/CAM системах [12, 13].

Начало эксплуатации CAD/CAM систем обеспечило формирование описания изделий для машинно-ориентированного производства с ориентацией на оборудование с ЧПУ [14]. Использование методов сплайновой геометрии в качестве языка описания позволило получить модели поверхностей основных агрегатов самолета, а затем решить одну из наиболее важных проблем самолетостроения – провести увязку всех сопрягающихся и соприкасающихся деталей и узлов до начала их производства. Была решена проблема моделирования геометрии сложнопрофильных изделий, а применение оборудования с ЧПУ обеспечило изготовление деталей и оснастки в производственных условиях предприятий с выполнением соответствующих требований к их качеству.

Сборочные процессы машинно-ориентированного типа производства ориентированы на применение клепальных автоматов с ЧПУ и широкой гаммы специализированного оборудования. Применение такого оборудования базируется на выполнении взаимной увязки всех деталей, узлов и агрегатов объекта производства на этапах его разработки в среде CAD/CAM систем, что создает принципиальную возможность получения всей необходимой информации для проектирования ТП сборки.

Постановка проблемы

Реализация процесса производства неразрывно связана с наличием информационной модели объекта производства – соответствующей формальной модели ограниченного набора фактов, понятий и инструкций, предназначенной для удовлетворения конкретному требованию [15]. В значительной мере степень соответствия выбранной модели заявленным требованиям определяется языком ее описания.

Чертеж детали – документ, содержащий изображение детали и другие данные, необходимые для ее изготовления и контроля [2]. При этом изображения детали выполняются на языке начертательной геометрии, а подходы к формированию документа рассчитаны на передачу информации непосредственно всем участникам жизненного цикла изделия (ЖЦИ) при человеко-ориентированном способе производства. Аналитические методы описания объектов производства, реализованные в эксплуатируемых CAD/CAM системах с применением сплайновой геометрии, представляют собой набор уравнений и неравенств, позволяющих описать координаты всех точек детали с присвоением им соответствующих характеристик. Такой способ описания объектов производства предназначен для машинно-ориентированных производств.

При достаточно простых геометрических формах точность каждого типа производств оказывается достаточной для обеспечения качества изделия. Сложные геометрические формы приводят к существенным различиям рассматриваемых моделей, а качество изделий человеко-ориентированного производства и трудоемкость процессов оказываются за пределами ожидаемых.

Описание одного изделия с использованием этих двух языков требует формирования двух моделей, что нарушает базовые принципы формирования информационного пространства.

Решать проблему предложено построением объектов производства средствами CAD/CAM систем с дополнениями их условными обозначениями, применяемыми при оформлении конструкторской документации человеко-ориентированного производства. Введен термин «электронная модель изделия» –

документ, содержащий электронную геометрическую модель детали и требования к ее изготовлению и контролю [2]. Эта модель должна использоваться в автоматизированных системах, для визуального отображения конструкции изделия в процессе выполнения проектных работ, производственных и иных операций, для изготовления чертежной конструкторской документации в электронной и/или бумажной форме [15]. В зависимости от стадии разработки электронная модель включает в себя предельные отклонения размеров, шероховатости поверхностей и др.

Термин «Электронная модель» не дает представления о способе описания объекта производства, о статусе такой модели при описании ЖЦИ. Понятие «электронный» не связано ни со структурой модели, ни со способом ее хранения, оно лишь указывает на применение компьютера для создания этой модели. Поэтому под электронные модели подпадают и описания изделий в CAD/CAM системах и сканированные с бумажных носителей изображения чертежей. При этом происходит объединение под одним понятием двух типов моделей, реализованных на различных принципах и языках. Такой подход существенно затрудняет переход к машинно-ориентированному производству, упрощая при этом разработку соответствующих стандартов их авторам. Необходимость выполнять разработку описаний объекта производства на двух языках в разы увеличивает трудоемкость проектирования изделия и трудоемкость его сопровождения на стадиях жизненного цикла.

1. Требования к электронным моделям сборки

Электронная модель сборочной единицы (СЕ) должна давать представление о расположении и взаимной связи составных частей, соединяемых в СЕ, и содержать необходимую и достаточную информацию для осуществления сборки и контроля СЕ [17]. Электронные модели деталей, входящие в ее состав, рекомендуется включать в модель как самостоятельные модели, размещая их в координатной системе и задавая данные расположения. С другой стороны, за основные конструкторские документы принимают: для деталей – чертеж детали и/или электронную модель детали; для сборочных единиц, комплексов и комплектов – спецификацию и/или электронную структуру изделия (конструкторскую) в соответствии с ГОСТ 2.053 [18], т.е. электронная модель деталей не является основным документом СЕ, что противоречит определению ее модели [17].

Модель сборки средствами CAD-систем формируется с помощью электронной структуры изделия. Эта же модель содержит данные о расположении каждой входящей детали. Геометрия деталей не должна включаться в модель сборки. Оригинальная модель каждой детали храниться в базе данных или файле, а в модель СЕ включены только ссылки на них. Непосредственное включение этих моделей в модель сборки приводит к нарушению единства информационного пространства, формируемого на предприятии.

Возрастание сложности авиационных конструкций приводит к увеличению количества деталей и связей между ними, которые физически реализуются при помощи широкой номенклатуры различных соединений. Именно эти элементы изделия в значительной степени определяют эффективность, надежность и безотказность функционирования авиационной техники. Разработка объектов авиационной техники в среде CAD/CAM систем предоставляет соответствующие функциональные возможности для формирования электронной структуры объектов любой степени сложности, что очень важно. При этом в соответствующих стандартах описания объекта производства [17, 18] отсутствует модель соединений при опи-

сании структуры изделия и в качестве особого элемента конструкции, формирующего изделий в целом. Соединения описываются как все другие элементы конструкции, хотя выполняемые ими функции различаются кардинально. Такой подход к соединениям при их описании не позволяет повысить эффективность их проектирования в среде CAD/CAM систем.

Под термином «электронный макет» подразумевается электронная модель изделия, описывающая его внешнюю форму и размеры, позволяющая полностью или частично оценить его взаимодействие с элементами производственного и/или эксплуатационного окружения, служащая для принятия решения при разработке изделия и процессов его изготовления и использования [17]. Как правило, такой макет выполняется на основании модели SE с использованием мультимедийных технологий, показывающих динамику перемещения и крайние положения перемещающихся, выдвигаемых или откидываемых частей, рычагов, кареток и т.п. С одной стороны, электронный макет является документом, описывающим объект производства. При этом он же позиционируется как способ описания процесса, правда без целей использования этих описаний при производстве и эксплуатации изделия, что не способствует снижению общей трудоемкости разработки документации.

2. Описание деталей изделий (аналитический эталон и портрет детали)

Широкая эксплуатация CAD/CAM-систем в машиностроении привели к повсеместному применению аналитических методов построения объектов производства с использованием сплайновой геометрии. Этому переходу в значительной мере способствовало массовое применение компьютерной техники. Объект любой степени сложности, разработанный в CAD-системе, имеют однозначное и корректное его описание. Переход к машинно-ориентированному производству диктует потребность существенного снижения трудоемкости формирования необходимой документации и улучшения наглядности представления информации. Для этого современные CAD/CAM системы обладают необходимыми функциональными возможностями, что и необходимо зафиксировать соответствующими понятиями и определениями.

Аналитический эталон геометрии детали – математическая модель геометрии детали, разработанную средствами и инструментами CAD-системы [3]. Эта достаточно лаконичная формулировка отражает и математический метод описания геометрии объекта производства и эталонный статус этой модели по отношению к другим описаниям, применяемым при сопровождении изделия на всех стадиях ЖЦИ. Кроме описания геометрических форм детали необходимо описать характеристики точности поверхностей детали, их микрорельеф, физические свойства материала и т.п., которые должны присутствовать в описании объекта производства. Многие применяемые символы при оформлении чертежа рассчитаны на дополнение ими информации плоских проекций. Для описания технических характеристик 3D-моделей объектов производства нужны способы более информативные и понятные для восприятия их как участниками ЖЦИ, так и программными комплексами машинно-ориентированного производства. При этом необходимо и снижение трудоемкости разработки документации.

Аналитический эталон детали (рис. 1) должен включать в себя следующие типы моделей [14]:

– эталонную модель геометрии поверхности и допусков макроотклонений ($ЭМ_r$);

- эталонную модели микрорельефа поверхности детали (шероховатость, волнистость) ($ЭМ_{\text{микро}}$);
- эталонную модель свойств (плотность материала, твердость, тип покрытий; износостойкость, допустимые напряжения и т.д.) детали, ее поверхностей ($ЭМ_{\text{с}}$).

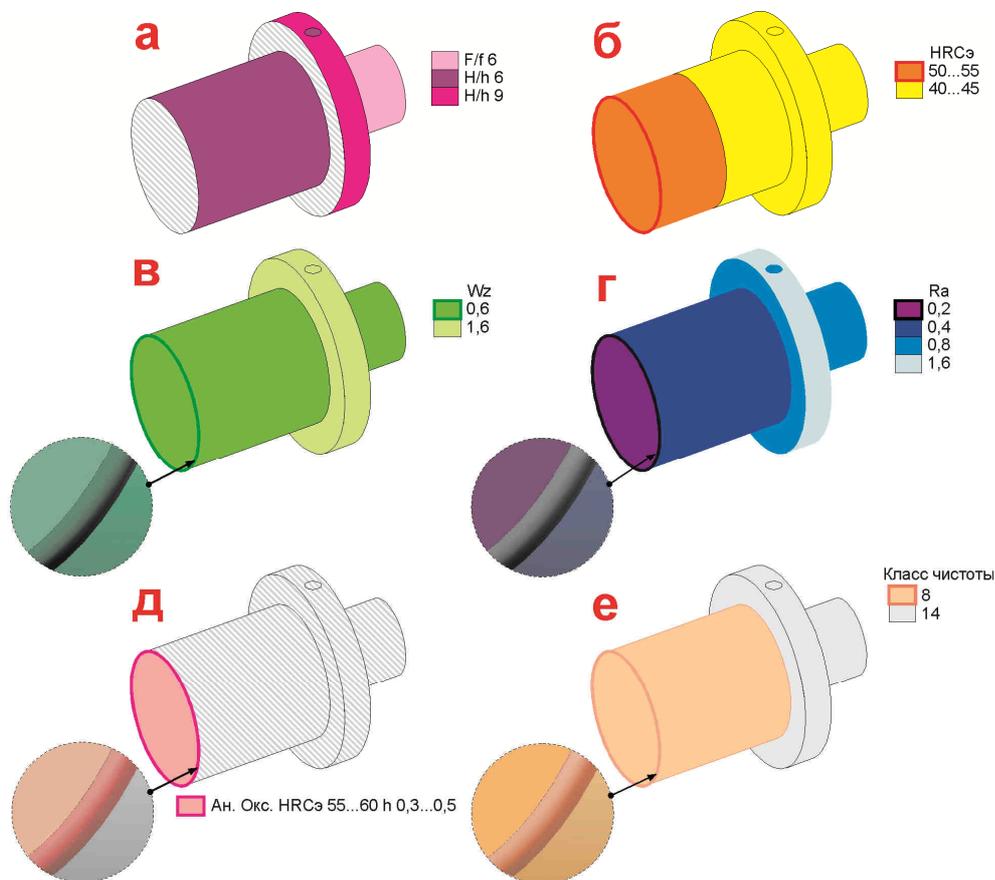


Рис. 1. Аналитический эталон детали: а – модель геометрии поверхности и допусков; б – эталонная модель твердости; в – эталонная модель волнистости; г – эталонная модель шероховатости; д – эталонная модель покрытий; е – эталонная модель промышленной чистоты

Модели покрытий, твердости поверхности, шероховатости и допусков строятся на базе эталонных моделей геометрии детали, который создается конструктором при помощи топологических операций CAD-системы из отдельных объемов (solid) или поверхностей (surface). Использование функций CAD-систем позволяет для принятых типов моделей предусмотреть возможность нанесения на каждую поверхность детали условных цветов или фактур.

На этапе конструирования изделия при построении $ЭМ_{\text{г}}$ детали разработчики присваивают каждому атрибуту поверхности значения в соответствии с принятым на предприятии стандартом. Это обеспечит однозначное восприятие информации всеми участниками ЖЦИ. Таблицы градации цветов в соответствии со значениями моделируемых параметров формируется один раз в рамках информационной системы (ИС) предприятия в соответствии со стандартами предприятия. Трудоемкость внесение информации для формирования моделей незначительна по сравнению со временем построения $ЭМ_{\text{г}}$.

Применение такого подхода позволяет реализовать использование на рабочих местах производственных подразделений аналитических эталонов деталей (АЭд) вместо чертежей. Сокращение трудоемкости напрямую зависит от кратности применения АЭд в процессе сопровождения изготовления и эксплуатации изделия. Если количество пользователей АЭд значительно превосходит количество их разработчиков, то проблема трудоемкости формирования таких моделей, пусть даже и высокой, перестанет быть актуальной. Поставленная таким образом задача указывает на необходимость применения компьютерной ИС предприятия для ее реализации.

После изготовления детали необходимо оценить степень ее соответствия эталону. Для выполнения этой процедуры необходимо иметь две модели: эталона и реальной детали. Последняя должна описывать контролируемые параметры детали, поэтому она названа «портретом». Если для эталона выбран язык аналитической геометрии, то и математическая модель портрета детали также должна быть описана этим же языком.

Таким образом, аналитический портрет геометрии детали – аналитическая модель, построенная по результатам измерений, описывающая контролируемые параметры реальной детали или ее фрагмента в системе координат аналитического эталона. Формирование такой модели по результатам измерений целесообразно выполнять с использованием инструментов CAD/CAM-систем.

3. Аналитический эталон изделия

Для описания собранного объекта производства используется понятие аналитический эталон сборки, который включает в себя (рис. 1):

- модель системы координат изделия;
- состав изделия и его электронную структуру;
- координаты аналитического эталона каждой детали и их ориентацию относительно системы координат сборки;
- ссылки на аналитические эталоны деталей.

Для исключения дублирования информации в базе данных должно быть организовано хранение только АЭд оригинальных деталей. Благодаря применению ссылок обеспечивается корректное использование информации при внесении изменений в конструкцию деталей и сборок.

В серийном производстве в течение ЖЦИ происходят изменения формы и других параметров объекта производства и эксплуатации, что должно описываться соответствующими моделями [19, 20]. Совокупность таких моделей, которые описывают состояние изделия (СИ) на всех стадиях его жизненного цикла и расположенных в хронологической последовательности, объединено понятием аналитический эталон изделия (рис. 2).

Аналитический эталон изделия – совокупность аналитических эталонов объекта производства, которая описывает состояние изделия на всех стадиях ЖЦИ:

$$СИ_i = АЭИ(t_i), \quad (1)$$

где i – номер текущего СИ, $i = 0, N$;

N – общее количество СИ в жизненном цикле.

Если жизненный цикл экземпляра изделия – последовательность процессов от начала запуска изделия в производство до его утилизации, то аналитический

эталон дает эталонное описание объекта на этих стадиях от начала его запуска в производство до окончания утилизации.

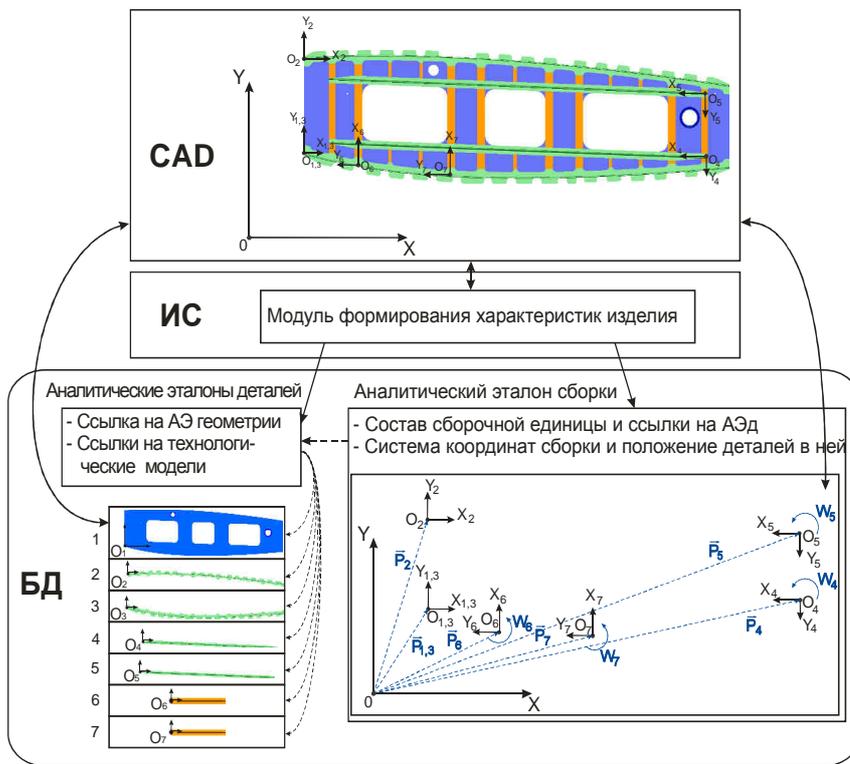


Рис. 1. Аналитический эталон сборки [7]

Таким образом, аналитический эталон изделия представляет собой модель, описывающую идеальную последовательность состояний изделий от начала его запуска в производство до окончания утилизации. Например, описания переходов от аналитических эталонов заготовок АЭ_з к аналитическим эталонам деталей являются моделями процессов изготовления деталей изделия:

$$МП_{Д} = АЭ_{з} \rightarrow АЭ_{Д}. \quad (2)$$



Рис. 2. Стадии ЖЦИ и аналитический эталон изделия

Совокупность моделей процессов для всех стадий является описанием ЖЦИ, что позволяет включить в это описание помимо технологических процессов изготовления объекта и процессы, связанные с его эксплуатацией.

Выводы

1. Необходимо реализовать формирование информации о технологических характеристиках объектов производства с использованием их аналитических методов описания в среде CAD/CAM систем.

2. При построении моделей сборочных единиц необходимо исключить непосредственное включение в их состав геометрической информации о деталях и их изменениях в процессе сборки. В эталонную модель сборки должны включаться только ссылки на соответствующие эталонные модели оригинальных деталей.

3. Предусмотреть возможность выделения соединений в модели сборочных единиц в виде самостоятельных модулей, что обеспечит возможность реализации применения эффективных методов разработки технологических процессов сборки при ТПП.

Список литературы

1. Монж Г. Начертательная геометрия / Г. Монж. – М.: АН СССР, 1947. – 294 с.
2. ГОСТ 2.102-2013. Виды и комплектность конструкторских документов. Введен 1.06.2014. Взамен 2.102-68. – М.: Стандартинформ, 2013. – 31 с.
3. Мялица А. К. Сравнение информационных свойств чертежа и аналитического эталона / А. К. Мялица // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4. – Х., 1999. – С. 37 – 43.
4. Леньков С. С. Шаблоны и объемная оснастка в самолетостроении / С. С. Леньков, С.Т. Орлов. – М.: Оборонгиз, 1963. – 399 с.
5. Сокунов Г. Н. Плазово-шаблонный метод производства / Г. Н. Сокунов. – М.: Машиностроение, 1982. – 176 с.
6. Технология самолетостроения / А.Л. Абибов, В.В. Бойцов, В. П. Григорьев и др. – М.: Машностроение, 1970. – 600 с.
7. Джентль Э. Изготовление шаблонов в самолетостроении / Э. Джентль. – М.: Оборонгиз, 1946. – 108 с.
8. Schoenberg I.J. Contributions to problem of approximation of equidistant data by analytic functions / I. J. Schoenberg // Quart. Appl. Math., Parts A and B. – 1946. – No. 4. – P 45 – 99, 112 – 141.
9. Piegle L. The NURBS book / L. Piegle, W. Tiller. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer. – 1997. – 578 p.
10. Математика и САПР: в 2-х кн. / П. Шенен, М. Коснар, И. Гардан и др. – М.: Мир. – 1988. – Кн. 1. – 204 с.
11. Математика и САПР: в 2-х кн. / П. Жермен-Лакур, П.Л. Жорж, Ф. Пистр, П. Безье. – М.: Мир. – 1989. – Кн. 2 – 264 с.
12. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К.Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
13. Юшкевич А.П. «История математики. Том 2: Математика XVII столетия», М. Наука, 1970. – 297 с.
14. Бычков И. В. Описание объекта производства для корректной постановки

задачи формообразования / И. В. Бычков // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 45. – Х., 2010. – С. 129 – 135.

15. ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы. Введен впервые 22.09.99. – М. Госстандарт. – 1999. – 11 с.

16. Мялица А. К. Основные принципы технологической подготовки машинно-ориентированного производства самолетов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 1998. – Вып. 2. – С. 3 – 9.

17. ГОСТ 2.052–2006. Электронная модель изделия. Общие положения. Введен в РФ 1.09.2006. – М.: Госстандарт. 2006 – 11 с.

18. ГОСТ 2.053 – 2006. Электронная структура изделия. Введен 01.09.2006. – Введен впервые. – М.: Стандартинформ. – 2006. – 10 с.

19. ГОСТ 2.051-2013. Электронные документы. Общие положения. Введен 1.06.2014. Взамен 2.051-2006. – М.: Стандартинформ, 2013. – 31 с.

20. Бычков И. В. Состояние изделия в течение его жизненного цикла / И. В. Бычков, Ю.В. Вашук // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 18. – Х., 2003. – С. 111 – 122.

Поступила в редакцию 15.09.2017

Формування інформації про технологічні характеристики об'єктів виробництва з використанням їх аналітичних методів опису в середовищі CAD / CAM систем

Дан аналіз способів передачі інформації про розміри виробів, визначені вимоги до електронних моделей збірки, аналітичних еталонів і портретів деталей, визначено склад аналітичного еталону виробу, а також стан виробу на всіх стадіях його життєвого циклу.

Ключові слова: машинно-орієнтоване виробництво, CAD / CAM системи, електронна модель складальної одиниці, аналітичний еталон виробу, життєвий цикл виробу.

Forming of Information on Technological Characteristics of Production Facilities Using their Analytical Methods of Description in the Environment of CAD / CAM Systems

The analysis of methods for transferring information about the dimensions of products is given, requirements are determined for electronic assembly models, analytical standards and portraits of details, the composition of the analytical product standard is determined, as well as the state of the product at all stages of its life cycle.

Keywords: machine-oriented production, CAD / CAM systems, electronic model of assembly unit, analytical master form of product, product life cycle.