

## **1.18. ВВЕДЕНИЕ В СОВРЕМЕННУЮ КОНЦЕПЦИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

**Цель лекции:** изучение положений концепции автоматизированной подготовки производства.

### **1.18.1. ПОНЯТИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА**

Одной из важнейших работ по проектированию изделия является технологическая подготовка производства, которая представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску продукции необходимого качества при установленных сроках, объеме производства и затратах.

Под технологической готовностью понимается наличие полного комплекта технологической документации и средств технологического оснащения, необходимых для производства новых изделий

Подготовка производства представляет собой комплекс взаимосвязанных мероприятий, обеспечивающих создание новых и совершенствование выпускаемых видов продукции, внедрение передовой технологии, эффективных методов организации труда, производства и управления.

Подготовка производства включает следующие стадии:

1. Проведение исследований, связанных с подготовкой производства.
2. Проектирование новой и совершенствование выпускаемой продукции.
3. Технологическая подготовка производства.

На современном этапе проектирования, подготовки производства и промышленного выпуска изделий, независимо от отраслевой принадлежности, возникают такие основополагающие проблемы и задачи, как ускорение вывода продукции на рынок, обеспечение поддержки изделия на всех этапах его жизненного цикла, сокращение затрат на проектирование, производство и испытания, возможность эффективного использования предыдущих наработок в новых изделиях. Решение указанных задач предусматривает управление и обмен данными по конструкции изделий, их составу и структуре, технологическому процессу производства, оборудованию и оснащению, а также результатам инженерных анализов и т.д. между различными средами разработки, инженерных расчетов, производства, контроля и испытаний, подготовки конструкторской, технологической и прочей документации, управления действующим производством, требованиями к изделию, взаимоотношениями с поставщиками и заказчиками. Чтобы выстроить подобную цепочку управления данными, современные предприятия проходят стадию цифровой трансформации, основным результатом которой должно стать внедрение так называемых цифровых двойников (digital twins), в терминологии концепции

«Industry 4.0» представляющих собой цифровые, т.е. полностью виртуальные макеты конструкции изделий в совокупности с моделями. Этот макет может опционально дополняться информацией о дальнейших этапах жизненного цикла изделия (например, данными по его эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонту и утилизации).

В общем случае цифровой двойник – это виртуальный аналог реального объекта или процесса. Он представляет собой цифровую программную модель, состоящую из связанных цифровых аналогов физических объектов, с возможностью отображения динамических изменений в процессе их взаимодействия. Особенностью цифрового двойника является возможность отражения состояния реального объекта при помощи датчиков и сенсоров. При изменениях материального объекта-оригинала также меняется состояние цифровой имитационной модели.

Классифицируют три типа цифровых двойников:

- для изделий,
- для процессов,
- для систем.

Цифровой двойник **изделия** представляет собой виртуальную модель реального объекта, является виртуальным макетом. Он предназначен для анализа поведения продукта в различных условиях и поиска потенциальных проблем. Данная модель состоит, как правило из детализированного трёхмерного объекта, имеющего свойства материалов, соответствующих реальным. В результате создания двойника изделия предприятие может точнее определить количество затрачиваемых материальных и трудовых ресурсов.

Цифровой двойник **процесса** имитирует производственные процессы. По аналогии с изделием, двойник процесса позволяет проанализировать и оптимизировать технологические операции до воплощения в реальной жизни. Модель включает в себя трехмерные объекты оборудования, рабочих мест, оснастки и производимых изделий. Также она может включать различные сценарии для случаев выхода оборудования из строя, уменьшения рабочей силы и других изменений в производстве. Таким образом, использование двойника процесса даёт возможность определять и отслеживать эффективность производства, избегая простоя оборудования.

Цифровой двойник **системы** аккумулирует в себе информацию обо всех операционных процессах, происходящих внутри предприятия, а также полную информацию о ресурсах, персонале. Указанная модель включает в себя большой объём данных, позволяет рассчитывать и оптимизировать все бизнес-процессы и наиболее пригодна для описания сложных технических систем.

Применение концепции цифровых двойников, в частности, позволяет:

- отказаться от создания множества физических прототипов на стадиях НИОКР, выполнив большинство дорогостоящих испытаний

на виртуальном макете и оптимизировав конструкцию по результатам этих испытаний;

- сократить срок разработки с одновременным повышением качества готового изделия за счет устранения ошибок и расхождений при выдаче/контроле исполнения технического задания (ТЗ), передаче данных, утверждении и внесении изменений в документацию между подразделениями предприятия и поставщиками;
- оценить показатели производственного процесса до непосредственного запуска нового изделия в производство, проверить ряд сценариев построения технологического процесса, компоновки производственных участков, назначения оборудования, оснащения и производственного персонала, выполнить нормирование производственных операций, выбрав и реализовав наиболее эффективный вариант реализации производства;
- быстрее реагировать на замечания и рекламации, поступающие от потребителей, внося соответствующие изменения в конструкцию и технологию изделия.

Цифровизация, проводимая в рамках поддержки жизненного цикла изделия электронной техники (PLM – Product Lifecycle Management), охватывает, в частности, такие важные этапы, как подготовка производства, его планирование и непосредственно сам процесс производства изделия. При этом современная концепция организации эффективных производств Industry 4.0 предусматривает виртуальное представление в виде цифровой модели не только самого изделия, но и всего его окружения, в том числе и объектов, задействованных в технологическом процессе производства – начиная с оборудования, оснастки, склада, материально-логистических потоков, обслуживающего персонала и вплоть до всего производственного участка в целом.

Следует отметить, что практика современного производства зачастую демонстрирует выборочность и интуитивность мероприятий по проектированию, организации и модернизации производственных процессов. Эта деятельность происходит в условиях ограниченной цифровизации, которая часто останавливается на этапе создания конструкторской модели изделия, что препятствует обеспечению высокой конкурентоспособности предприятий или, во всяком случае, не позволяет в полной мере достичь ее.

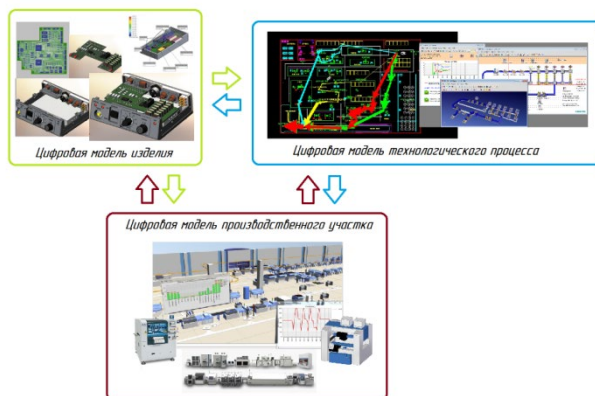
Используя же системный подход к организации и планированию производства, осуществляя цифровизацию в полном объеме, включая производственную компоненту, и выделяя на это соответствующие ресурсы до начала внедрения физических изменений, можно избежать дорогостоящих корректировочных действий в процессе производства и таким образом сократить сроки изготовления изделия, снизить затраты и ускорить получение прибыли.

Еще десятилетие назад была распространена точка зрения, что для решения задач цифровизации достаточно создать цифровую модель изделия – объекта проектирования/производства. Такой подход позволял эффективно ре-

шать задачи конструкторского проектирования (CAD) и инженерного анализа (CAE) и частично – задачи подготовки производства (CAM), в основном – машиностроительного, ориентированного на операции литья, штамповки, обработки резанием и пр. Связь с производством при таком подходе реализуется в виде однонаправленного процесса, позволяющего лишь оценить, насколько данное изделие подходит для встраивания в уже сложившуюся производственную структуру. Гибкая переналадка, адаптация, вариативность производства здесь существенно ограничены.

В качестве объекта проектирования будем рассматривать сборочное производство электронных модулей первого уровня на печатных платах. Специфика производства модулей и блоков изделий приборостроения предусматривает большое количество сборочных операций с созданием неразъемных соединений пайкой, сваркой, склеиванием и т.д., многономенклатурный мелко- и среднесерийный характер производства, быструю переналадку на выпуск новых изделий, широкий набор автоматизированного сборочного оборудования, объединенного в технологические линии и гибкие производственные участки, определенную долю ручных операций сборки, контроля и ремонта. Чтобы учесть эту специфику необходимо, помимо цифровой модели изделия, также обладать и цифровой моделью производства с учетом всех его технико-экономических аспектов – оборудования, оснащения, персонала, комплектующих, технологических процессов и маршрутов, материально-логистических потоков в пределах участка/склада, показателей производительности, точности, безотказности, минимизации времени переналадки, вынужденных простоев оборудования, оптимизации технологических маршрутов, количества обслуживающего персонала и т.д.

Описанной выше подход к объединению моделей изделия, технологических процессов и производства в рамках единой комплексной структуры представлен на рис. 1.156.



**Рис. 1.156.** Взаимодействие цифровых моделей изделия, технологического процесса и производства в рамках единой комплексной цифровой структуры

Программное обеспечение для цифрового планирования и ИТ-инфраструктура, предоставляемые «Цифровым производством», образуют основной строительный блок для организации эффективного «цифрового» сотрудничества между проектированием и планированием производства. Предоставление специалистам в области планирования и подготовки производства доступа к цифровым данным об изделиях непосредственно в среде планирования позволяет им гораздо проще и тщательнее проверять данные на соответствие требованиям производства. Используя трехмерные цифровые модели, планировщики могут разрабатывать свои требования и предлагаемые модификации – особенно в части проектирования с учетом технологичности на гораздо более ранней стадии и на более надежной основе, чем раньше.

В такой высокотехнологичной отрасли с изначально высоким уровнем цифровизации, какой является производство изделий приборостроения, перечисленные преимущества цифровых двойников проявляются наиболее ярко, а их внедрение обещает существенную экономию ресурсов и средств предприятия.

Рассмотрим внедрение цифровых двойников в технологический процесс и производство. Существует два распространенных типовых сценария: подготовка действующего производства для запуска нового изделия и создание нового производственного участка под типовое изделие. Первый из указанных сценариев рассмотрен далее в разделах «Подготовка запуска нового изделия в производство» и «Обеспечение прослеживаемости в процессе производства», второй – в разделе «Комплексная методика синтеза производственных систем».

### **1.18.2. ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Как правило, при описании сложных технических объектов аналитические модели либо отсутствуют полностью, либо лишь частично могут отразить сложные взаимосвязи объектов производства, а также определить отклик производственной структуры на возмущающие воздействия. Изучение же реально работающего производства также сталкивается с неизбежными проблемами, связанными прежде всего с тем, что параметры процесса для стороннего наблюдателя в большинстве случаев не являются формализованными и четко прослеживаемыми, что затрудняет понимание наблюдаемых производственных процессов. Кроме того, на действующем производстве невозможно проводить учебные эксперименты с целью выявления отклика на возмущающие воздействия. Немаловажны также экономические и организационные сложности такого варианта обучения.

Решение указанной проблемы возможно при внедрении методов и средств имитационного моделирования сложных технических объектов. При условии обеспечения адекватности модели реальному производственному процессу

она в состоянии выступить заменой в образовательных целях реальному действующему производству. Цифровая модель позволит не только комплексно изучить протекающие на производстве процессы, но и четко формализовать входные и выходные параметры процесса, а также поставить ряд экспериментов вида «что, если», подавая на вход модели различные возмущающие воздействия. Все это в комплексе даст законченное представление об изучаемом предмете.

В рамках курса рассматривается сборочное производство электронных модулей на печатных платах, как одно из наиболее распространенных и готовых к цифровизации типов производства электроники.

Задача формулируется следующим образом: требуется создать цифровую модель участка сборки электронных модулей на печатных платах по смешанной технологии (с применением поверхностного монтажа и монтажа в отверстия), отражающую совокупность производственных объектов – оборудования, оснащения, склада, комплектующих, незавершенного производства и готовых изделий, персонала, а также временные и логистические взаимосвязи между ними. Модель должна адекватно описывать подготовку производства, технологический процесс сборки и быть способной к выдаче ключевых временных параметров сборочного производства – штучных/калькуляционных времен выполнения каждой операции и общей производительности сборки, понимаемой как количество изготавливаемых изделий в единицу времени.

В общем случае моделирование – это замещение реального физического объекта его условным образом, то есть моделью, с целью изучения свойств объекта-оригинала. Одна из целей процесса моделирования – описать и спрогнозировать поведение объекта при изменяющихся параметрах. Принципиальным при моделировании любых технологических объектов является упрощенное отражение в модели их важнейших для данного исследования свойств; модель воспроизводит объект в определенном ограниченном диапазоне условий и требований; различные модели могут описывать различные стороны объекта.

Для решения задач моделирования объектов принципиально возможно применение методов аналитического и имитационного моделирования. Первая группа относится к статическим методам, где результирующие параметры модели вычисляются по формулам с жестко детерминированным результатом. С помощью таких методов невозможно рассматривать сложные динамические процессы, подверженные внешним и внутренним возмущениям, а именно такие процессы имеют место в производстве электронной техники, для которых характерны вариативность техпроцесса, частые переналадки при смене выпускаемых изделий, вынужденные простои из-за сбоев и отказов оборудования, влияние качества комплектующих, проявления человеческого фактора в лице операторов и т.д. Большинство перечисленных выше факторов носит вероятностный характер и обладает изменчивостью во времени. Следовательно, построение модели, адекватной реальному производству, будет возможно с

применением более гибких методов комплексного (имитационного) моделирования, которые позволяют создавать модель на основе последовательности событий, управлять ею во времени, вносить случайные флуктуации и накладывать ресурсные и прочие ограничения. Результаты имитационного моделирования, в отличие от аналитического, являются продуктом статистической обработки данных, наблюдаемых и фиксируемых в процессе работы моделирующей программы. Имитационная модель, как объект измерений, в отличие от реальных систем является полнодоступной системой.

В любом исследовании, связанном с применением имитационного моделирования, выделяют следующие этапы:

1. Разработка абстрактной модели.
2. Параметризация модели.
3. Реализация модели с использованием программной системы моделирования.
4. Анализ модели.
5. Проведение экспериментов на работающей модели.
6. Анализ результатов.

Построение дискретной имитационной модели сборочного производства электронных модулей на печатных платах, процесс моделирования и анализ полученных результатов будут последовательно рассмотрены в дальнейших лекциях и на практических занятиях в рамках курса.

## Тесты к лекции 18

1. Что такое цифровой двойник применительно к производству изделий приборостроения?

- а) цифровая модель изделия;
- б) цифровая модель изделия и технологического процесса его изготовления;
- в) цифровая модель изделия, технологического процесса и производства.

2. Чем принципиально отличаются между собой аналитические и имитационные методы моделирования?

- а) каждый метод моделирования одновременно является и аналитическим, и имитационным;
- б) результат аналитического метода жестко детерминирован, имитационного – является продуктом статистической обработки;
- в) аналитические методы, в отличие от имитационных, невозможно применить для моделирования производства.

3. Какой из перечисленных этапов не относится к исследованию, связанному с применением имитационного моделирования?

- а) параметризация модели;
- б) анализ модели;
- в) вычисление результирующих параметров модели по формулам.