

УДК 681.3.06

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ САМОЛЕТНЫХ АГРЕГАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2016 П.Ю. Гусев¹, Ю.С. Скрипченко¹, Д.В. Лысов²

¹ Воронежский государственный технический университет

² ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество»

Статья поступила в редакцию 13.10.2016

В статье приводятся результаты исследования производства деталей из полимерных композиционных материалов для агрегатов самолета SSJ-100. Для проведения исследования предлагается метод имитационного моделирования и проводится его сравнение с аналитическими методами. Для разработки имитационной модели проводится сбор исходных данных, а также приводятся основные технологические аспекты производства деталей из полимерных композиционных материалов. В результате подготовки исходных данных определены потенциально проблемные места производственной системы. Проводится описание разработки логической части имитационной модели, а также ее структуры. В качестве способа продвижения времени в имитационной модели используется дискретно событийный подход. Для разработки имитационной модели применяется программный комплекс Tecnomatix Plant Simulation. Разработанная имитационная модель имеет иерархическую структуру. Это позволило создать несколько уровней вложенности, что положительно отразилось на последующих изменениях модели. При изменении части исходных данных модель автоматически подстраивалась и не требовала глобально доработки. На основе имитационной модели по исходным данным проведен анализ производственной системы и сделаны выводы о «узких» местах. Такими «узкими» местами в имитационной модели стали количество оснастки и операция термостатирования. В статье показана возможность оптимизации имитационной модели по исходным данным. При этом изменение распределения работ по участкам не затрагивается. Однако полная оптимизация модели позволила достичь лучшего результата. В результате оптимизации разработана новая имитационная модель. Имитационные прогоны разработанной модели получены оптимальные параметры производственной системы и составлены практические рекомендации. Таким образом, общее время изготовления 5 машино-комплектов деталей, снизилось на 15%. При этом уменьшились площади межоперационного хранения. С применением высокотехнологичного оборудования и введением третьего автоклава возможно снижение времени изготовления 5 машино-комплектов деталей на 35%. В данной статье показан успешный опыт применения имитационного моделирования для оптимизации производства деталей из ПКМ для самолета SSJ-100.

Ключевые слова: имитационное моделирование, самолетные агрегаты, производство деталей, оптимизация, анализ.

Работа выполнена в рамках Постановления Правительства России от 9 апреля 2010 г. N 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Производство деталей самолетных агрегатов в настоящее время представляет собой сложную многофакторную задачу. Множество факторов этой задачи распространяется на все процессы и технические средства, участвующие в производстве. Оптимальное решение поставленной задачи включает исследование всех возможных изменений состояний интересующих объектов. Для решения этих задач можно применить ана-

литические методы исследования. Это позволит в короткий срок получить результат, который обеспечит решение некоторых производственных задач. Однако аналитические методы имеют ряд очевидных недостатков.

Прежде всего, аналитические методы расчета зачастую применяют относительно сложный математический аппарат для решения даже самых простых задач. Как следствие, человеку выполняющему расчет, необходимо ознакомиться со всеми математическими положениями, которые использует конкретный метод. Также следует отметить ограниченность входных данных, используемых в аналитических методах. Не каждый метод способен справиться с увеличением потока входных данных, особенно метод, предназначенный для решения какой-либо конкретной задачи. Еще одним недостатком аналитических методов

Гусев Павел Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования. E-mail: gusevpyl@gmail.com

Скрипченко Юрий Степанович, кандидат технических наук, профессор кафедры компьютерных интеллектуальных технологий проектирования.

E-mail: scripch@yandex.ru

Лысов Дмитрий Вячеславович, заместитель главного технолога.

является относительная точность расчета при решении задач со стохастическими входными величинами или при условии использования динамически изменяющихся величин. В таком случае все факторы, которые могут случайным образом повлиять на исследуемую задачу, исключаются из условия.

Эти недостатки приводят в процессе производства деталей самолетных агрегатов к потерям времени и снижению эффективности всего производственного процесса. В качестве примера можно рассмотреть выпуск заданного количества машино-комплектов деталей. Для выполнения производственной программы производится расчет необходимых материалов, человеческих и технических средств и разрабатывается цикловой график выпуска деталей. В результате получается график, не учитывающий возможные задержки в поступлении материалов, нестабильность выполнения плана рабочими, выходы из строя технических средств. Как правило, в таком случае, время выпуска заданного количества машино-комплектов деталей значительно увеличивается, что ведет к невыполнению поставленных задач.

Для устранения недостатков, присущих аналитическим методам, возможно применение имитационного моделирования как способа решения производственных задач, поиска «узких» мест и повышения эффективности производства в целом. Имитационное моделирование позволяет моделировать реальные производственные процессы так, как они происходили бы в действительности. При этом возможно учесть те факторы, которые могут случайным образом повлиять на производственный процесс [4].

Следует отметить, что зачастую имитационное моделирование рассматривается как один из самых сложных методов исследования систем. Такое утверждение полностью себя оправдывает при разработке имитационной модели на языке программирования. Однако, в настоящее время, существует множество комплексов имитационного моделирования с графическим интерфейсом, которые позволяют разрабатывать сложные имитационные модели в кратчайшие сроки и получать достоверный результат. Не следует забывать, что применение таких комплексов без должного теоретического обоснования имитационной модели может оказать отрицательное влияние на результат. Формализация исследуемой системы, определение переменных состояния, выявление событий позволяют создать имитационную модель, которая будет достаточно достоверной для принятия решения по повышению эффективности производства.

В данной статье проводится исследование производства деталей из полимерных композиционных материалов для самолета SSJ-100 с применением имитационного моделирования. Исследуемое производство располагается на тер-

ритории ПАО «ВАСО», г.Воронеж. Цель проводимого исследования – анализ существующих «узких» мест и оптимизация производственной системы для повышения эффективности производства.

Для создания имитационной модели определена исследуемая система – цех по производству деталей из полимерных композиционных материалов. Производственный цех можно исследовать как систему, поскольку наблюдается соответствие всем признакам системы:

1. цех представляет собой целостный комплекс взаимосвязанных объектов;
2. цех производит взаимодействие с внешними объектами, в т.ч. и с другими цехами;
3. цех обладает свойством иерархичности и для цеховых подразделений представляет собой систему более высокого порядка.

Все подразделения, являющиеся подсистемами цеха, также могут быть представлены как самостоятельные системы. Это важно для построения имитационной модели производства самолетных агрегатов, поскольку в таком случае каждый участок цеха можно выделить в виде отдельной модели. Каждый производственный участок также обладает признаками системы:

1. состоит из более мелких объектов, деятельность которых направлена на достижение общей цели;
2. осуществляет двунаправленное взаимодействие с общей цеховой системой;
3. обратная связь с цеховой системой позволяет получать информацию по ходу производства и регулировать деятельность подразделения;
4. каждый участок имеет граничные условия существования.

В выделенных системах важную роль играют объекты, поведение которых требуется учитывать для достижения поставленной цели исследования. Наиболее важными объектами исследуемой системы являются самолетные агрегаты, которые, в свою очередь, состоят из деталей. Непосредственно поведение деталей как объектов задает поведение всей системы в целом. Интересующими объектами в исследовании выступают также человеческие ресурсы и технические средства производства.

Для создания имитационной модели цеха производства деталей из ПКМ проведена работа по изучению технологии изготовления деталей. Цех по производству деталей из ПКМ представляет собой систему, состоящую из заготовительных, складских, механообработывающих, лакокрасочных и производственных участков, а также участков выкладки и термостатирования. Совокупная деятельность всех перечисленных участков направлена на изготовление деталей, применяемых в самолетных агрегатах.

Детали из ПКМ для самолета SSJ-100 разделяются на ограниченное количество групп деталей. Основной метод изготовления таких деталей – метод автоклавного формования.

Принцип данного метода изготовления заключается в выкладке клеевого материала на оснастку и дальнейшем формовании в автоклавах. Однако следует отметить, что детали из разных групп имеют различную технологию изготовления. Поэтому автоклавное формование для каждой из групп осуществляется отдельно. Это накладывает дополнительные сложности как при распределении потока деталей, поступающих на формование, так и на реализацию данного действия в имитационной модели.

Технология изготовления деталей из ПКМ в общем виде содержит несколько обязательных операций:

1. выкладка;
2. формование детали на оснастке в автоклаве;
3. механическая обработка формованной детали;
4. покрытие детали лакокрасочными компонентами;
5. проверочные и контрольные операции.

Каждый технологический этап изготовления детали из ПКМ производится на соответствующем участке. Разделение технологических операций по отдельным участкам позволяет упорядочить управление материальными потоками, как в реальном производстве, так и в имитационной модели. В исследуемой системе цеха производства деталей из ПКМ существуют дублирующие участки, разделяющие между собой однотипные производственные задачи.

Для создания, анализа и оптимизации имитационной модели собраны исходные данные цеховой производственной системы, содержащие:

1. компоновку цеховых подразделений;
2. размеры производственных участков;
3. планировочные планы производственных участков;
4. количество и квалификация рабочих, участвующих в производстве;
5. описание всех технических средств, участвующих в производстве;
6. заданную производственную программу.

Все эти данные позволяют в полной мере смоделировать реальные производственные процессы. Отдельно следует отметить важность достоверности исходных данных. От этого непосредственно зависит достоверность получаемого результата. Для создания имитационной модели также собраны исходные данные по каждой изготавливаемой детали и используемой оснастке.

На основе анализа исходных данных принято решение о разработке дискретно-событийной имитационной модели. Перед разработкой имитационной модели требуется определить основные события, происходящие в производственной системе. Также особое внимание при разработке имитационной модели уделяется построению структуры взаимодействующих объектов.

В разработанной имитационной модели представлены следующие основные типы событий:

1. поступление материала для выкладки детали;
2. выкладка материала на оснастку;
3. формование детали в автоклаве;
4. механическая обработка;
5. проведение контрольных операций;
6. уход детали из имитационной модели;
7. завершение имитационного моделирования.

Выделенные события оказывают решающее значение на поведение всей исследуемой системы. Следует сделать замечание по поводу события «завершение имитационного моделирования». Данное событие возникает только по совокупности выполнения определенных условий, которые формируются в результате многократного повторения событий 1-6. Эти условия целиком зависят от поставленных целей исследования.

Для создания имитационной модели в программном комплексе имитационного моделирования разработаны общие принципы устройства модели. Также уделено внимание построению связей между взаимодействующими элементами в имитационной модели. Правильная организация структуры имитационной модели особенно важна на этапе оптимизации. Структура должна позволять изменять отдельные части модели без затрагивания других компонентов.

Для построения структуры модели выбрана наиболее логичная и интуитивно понятная иерархическая система. Такая система позволила реализовать описанную выше цеховую систему с вложенными системами более низкого уровня. Таким образом, верхний уровень имитационной модели представляет собой цеховую планировку, на которой располагаются производственные участки.

Для создания имитационной модели цеха по производству деталей из ПКМ применен программный комплекс имитационного моделирования компании Siemens PLM Software Tecnomatix Plant Simulation. Представленный программный комплекс позволил организовать структуру основных объектов в виде вложенных папок, как представлено на рис. 1.

В каждой из папок содержатся объекты, имитирующие производственный процесс или событие. Каждый из таких объектов является родительским для объекта, который добавляется в основную рабочую область имитационной модели. Такой подход позволил глобально управлять изменениями в однотипных объектах [7].

Подробно создание имитационной модели цеха по производству деталей из ПКМ отражено в работе [2]. Однако следует указать особенности имитационной модели по производству деталей из ПКМ для самолета SSJ-100.

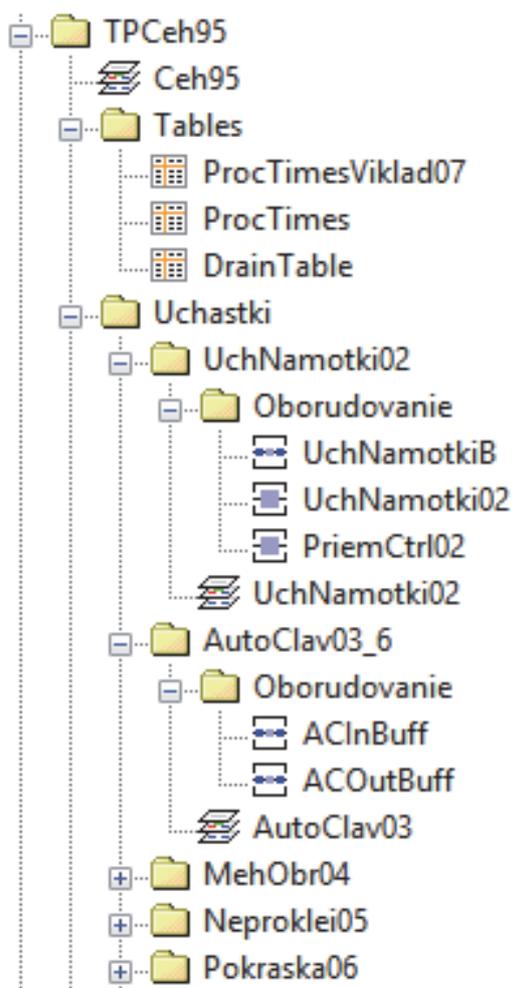


Рис. 1. Структура объектов в имитационной модели

Для создания агрегатов самолета SSJ-100 все детали из ПКМ делятся на 12 групп. При этом каждая группа деталей изготавливается по одной директивной технологии, но может иметь отличия также внутри группы. Также следует отметить, что существуют группы деталей, у которых за время изготовления операция автоклавного формования может применяться 2 и более раз. Такое количество групп и особенности их многократного формования накладывают дополнительные трудности при оптимизации материальных потоков.

Согласно цели исследования в ходе анализа имитационной модели производилось определение «узких» мест производства. Для этого проведены имитационные прогоны с целевым показателем 5 машино-комплектов деталей в месяц. В результате, выявлены следующие проблемные места производственной системы цеха:

1. для деталей с большой трудоемкостью изготовления не достаточно оснастки;
2. очередь загрузки автоклава требует доработки;
3. распределение рабочих по однотипным участкам не соответствует загрузке участков;

Проведенный анализ определил 2 основных «узких» места производства деталей из ПКМ –

недостаточное количество оснастки и очередь на участке автоклавного формования. Распределение рабочих по участкам не является критичным «узким» местом. Однако перераспределение рабочих или объединение участков позволило повысить эффективность всего производства в целом.

Оптимизация разработанной имитационной модели принесла удовлетворительный результат. В первую очередь это объясняется тем, что расположение и количество участков осталось прежними. Оптимизация позволила установить возможность производства 5 машино-комплектов деталей в месяц, но, при этом, не удалось качественно повысить эффективность производственного процесса в целом. Для устранения недостатков имитационной модели по исходным данным, а также для оценки максимальных возможностей производства, создана оптимизированная имитационная модель цеха по производству деталей из ПКМ для самолета SSJ-100.

В новой разработанной имитационной модели решены следующие проблемы исходной версии:

- все однотипные участки объединены по технологическому принципу;
- все автоклавы собраны на одном участке;
- на всех участках введена возможность исследования применения высокотехнологичного оборудования.

Объединение участков по технологическому принципу позволило уменьшить сложность распределения деталей из разных групп. Теперь все детали поступают на один участок и затем уже распределяются в зависимости от стадии изготовления. Внутри созданных объединенных участков предусмотрены имитации рабочих с разной специализацией и разной квалификацией. Такое уточнение позволило точно определить количество требуемых рабочих.

Объединенный участок выкладки позволил определить необходимую площадь под рассматриваемую технологическую операцию. При моделировании отдельных участков выкладки, необходимо было учитывать, какой участок занимается той или иной группой деталей. Такое уточнение также накладывало дополнительные затраты времени в реальном производстве, т.к. в одно и тоже время один участок мог быть перегружен, а на другом участке загрузка составляла не более 50%.

Аналогичные задачи решены применением объединенного участка механической обработки. Точная требуемая площадь для механообработки операций позволяет провести эффективную компоновку производственных подразделений. Также такой участок позволяет сократить маршрут, преодолеваемую деталью между операциями формования и нанесения лакокрасочного покрытия. Унификация выполняемых операций снизила трудоемкость изготовления деталей, а как следствие агрегатов в целом [5].

Логическое объединение всех автоклавов на одном участке в имитационной модели позволило разработать алгоритм выбора групп деталей для формования. Разумеется, на реальном действующем производстве не удастся создать объединенного автоклавного участка ввиду дороговизны их перемещения с мест установки. Однако распределение деталей из единой очереди позволяет максимально эффективно использовать имеющиеся технические средства производства.

Для разработки оптимального алгоритма управления поступающей очередью деталей применены положения теории массового обслуживания. В данном случае поток поступающих деталей рассматривался как многоканальная многофазная СМО. Особенностью рассматриваемой системы является дисциплина очереди. Обслуживающее устройство, представленное автоклавом, в СМО может обрабатывать одновременно несколько требований. Эти требования разделены по группам на основании заранее известных критериев. Выбор следующей группы требований для обслуживания основывается на времени обслуживания, вероятности поступления требования из группы, количеству требований в группе. Все критерии выбора следующей группы для обслуживания учитываются одновременно, но имеют разное влияние на принятие решения. Окончательное решение о передаче группы требования для обслуживания принимает человек. Дополнительным ограничением выступает ограниченное количество требований, которое одновременно может обслужить устройство. В таком случае правила для дисциплины очереди в рассматриваемой системе невозможно описать четкими логическими выражениями. В рассматриваемой системе использованы нечеткие правила дисциплины очереди [1]. Таким образом, для управления потоком поступающих деталей использована модель выбора требований

для обслуживания с нечеткими правилами дисциплины очереди.

Введение в имитационную модель возможности исследования применения высокотехнологического оборудования на участках необходимо для оценки эффективности обновления активной части основных фондов. На участке механической обработки в оптимизированной имитационной модели проведена оценка требуемого количества высокотехнологичных центров обработки «Endura». На участке выкладки проведена оценка эффективности и требуемого количества автоматизированных раскройных комплексов и лазерных систем позиционирования. Автоматизированные раскройные комплексы применяются для подготовки композитного материала.

Оптимизированная имитационная модель производства деталей из ПКМ представлена на рис. 2.

С использованием разработанной оптимизированной имитационной модели получены цикловые графики изготовления деталей по группам. Применение цикловых графиков в значительной степени повышает информативность полученных результатов. Также цикловые графики позволяют контролировать весь производственный процесс и определять потенциально «узкие» места в реальном времени. Определение «узких» мест основывается на несоответствии времени изготовления согласно цикловому графику и реальному времени изготовления [3].

На рис. 3 представлен цикловой график выпуска деталей для 12 группы.

Как видно из циклового графика все детали, требуемые на 1 машино-комплект, проходят совместную обработку. Незначительное различие во времени выпуска готовой детали объясняется учетом стохастических переменных. Таким образом, получен цикловой график, который отображает реальный ожидаемый результат в случае выполнения всех оптимизационных решений.

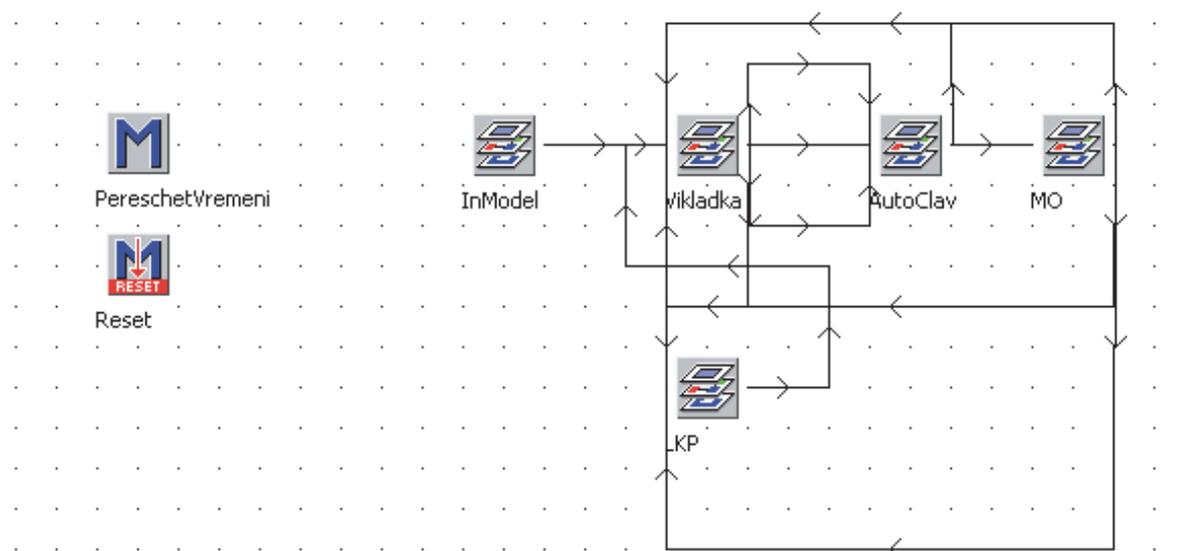


Рис. 2. Оптимизированная имитационная модель

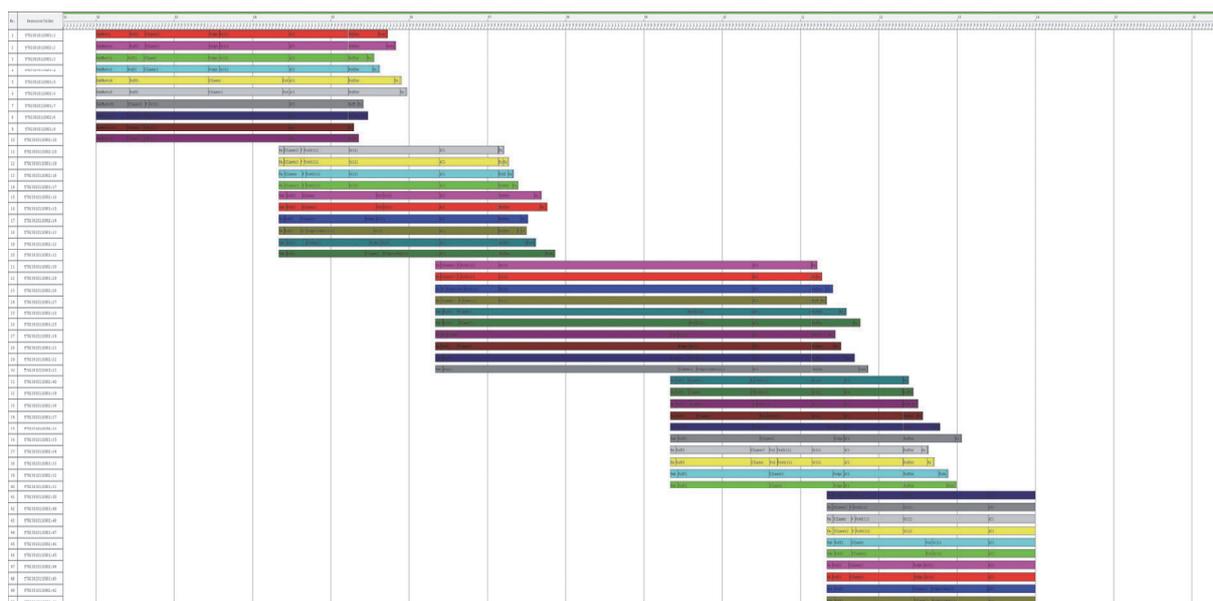


Рис. 3. Цикловой график выпуска деталей из 1 группы

В результате имитационного моделирования производства деталей из ПКМ для самолета SSJ-100 создано 2 версии имитационных моделей. Первая имитационная модель отображает состояние исследуемой системы согласно исходным данным и является основой для анализа «узких» мест производства. Такая имитационная модель позволяет в кратчайшие сроки принимать оперативные производственные решения в таких ситуациях как изменение производственной программы или выход из строя оборудования.

На основе имитационной модели по исходным данным разработана оптимизированная имитационная модель, учитывающая все «узкие» места действующего производства. В данной имитационной модели определены оптимальные параметры производственной системы и найдены решения, позволяющие повысить эффективность производственного процесса. Согласно оптимизированной модели получены следующие результаты:

- введение единого участка выкладки уменьшило время, требуемое на изготовление 5 машино-комплектов деталей, на 18%;
- введение единого участка механической обработки уменьшило время, требуемое на изготовление 5 машино-комплектов деталей, на 15%;
- применение дисциплины обслуживания очереди с нечеткими правилами обслуживания позволило сократить требуемое количество автоклавов до 2;
- оптимизация использования оснастки уменьшила ее количество на 37%, даже с учетом введения дополнительной оснастки для крупногабаритных деталей;
- оптимизация размещения производственных подразделений позволила сократить время транспортировки групп деталей на 21%.

Таким образом, общее время изготовления 5 машино-комплектов деталей, снизилось на 15%. При этом уменьшились площади межоперационного хранения. С применением высокотехнологичного оборудования и введением третьего автоклава возможно снижение времени изготовления 5 машино-комплектов деталей на 35%.

Таким образом, в данной статье показан успешный опыт применения имитационного моделирования для оптимизации производства деталей из ПКМ для самолета SSJ-100. На основании полученных результатов подготовлены рекомендации по оптимизации производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев К.Ю., Бурковский В.Л. Моделирование динамики нелинейных объектов на основе нечеткой нейронной сети // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 3-1. С. 13-17.
2. Гусев П.Ю., Чижов М.И., Скрипченко Ю.С. Имитационное моделирование производства деталей из полимерных композиционных материалов // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 2. С. 245-252.
3. Рыжков В.А., Паринов М.В., Юров А.Н. Использование теории конструктивно-технологической сложности для оптимизации технологических процессов ступенчатой сборки летательных аппаратов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. №. 12-2.
4. Чижов М.И., Бредихин А.В. Разработка подхода к автоматизации технологической подготовки производства в PLM системе Teamcenter // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. №. 12-1.
5. Чижов М.И., Мануковский А.Ю., Ветохин В.В. Использование систем числового программного управления при комбинированной обработке // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. №. 12-2.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DETAILS OF AIRCRAFT UNITS USING SIMULATION

© 2016 P.Yu. Gusev¹, Yu.S. Skripchenko¹, D.V. Lysov²

¹ Voronezh State Technical University

² Public Company «Voronezh Joint Stock Aircraft Company»

The article presents the results of the study the production of parts made of polymer composite materials for aircraft units SSJ-100. To conduct the study proposed simulation method and is carried out its comparison with analytical methods. To develop a simulation model is collecting baseline data and presents the main technological aspects of the production of parts made of polymer composite materials. As a result, the preparation of input data to identify potential problem areas of the production system. Held description of the logical development of the simulation model as well as its structure. As a way of promoting time in the simulation model using discrete event approach. To develop a simulation model used software package Tecnomatix Plant Simulation. The developed simulation model has a hierarchical structure. It is possible to create multiple levels of nesting, which has a positive effect on subsequent changes in the model. If you change the source of the data model automatically adjust and did not require improvements globally. Based on a simulation model based on initial data analysis of the production system and the conclusions of the “narrow” places. These “narrow” places in the simulation models have become the number of equipment and temperature control operation. The article shows the possibility to optimize the simulation model for the original data. The change in the distribution of work on the site is not affected. However, the complete optimization model has achieved a better result. As a result of optimization of the new simulation model is developed. Simulation runs developed model obtained the optimum parameters of the production system and compiled best practices. Thus, the total production time of 5 sets of machine-parts, decreased by 15%. This decreased inter-operation storage area. With the use of high-tech equipment and the introduction of the third autoclave may reduce the manufacturing time of 5 car-kits of parts by 35%. This article shows the successful experience of the application of simulation to optimize the production of parts from composite materials for the aircraft SSJ-100.

Keywords: simulation, aircraft assemblies, production of parts, optimization, analysis.

*Pavel Gusev, Candidate of Technics, Associate Professor at the Computer Intelligent Design Technologies Department.
E-mail: gusevpvl@gmail.com*

*Yrii Skripchenko, Candidate of Technics, Professor at the Computer Intelligent Design Technologies Department.
E-mail: skripch@yandex.ru*

Dmitriy Lysov, Deputy Chief Technologist.