

УДК 004.942

А. В. ПОПОВ, М. А. МОМОТ, Е. С. СЕРГЕЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЕРИФИКАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ

Проводится выявление задач, решением которых занимаются современные программные комплексы на производстве. Осуществляется анализ методов проведения сборки, а именно селективный и теоретико-вероятностный методы, приводятся примеры реализации рассматриваемых алгоритмов на основе использования сети Петри. Рассматривается механизм преобразования схем сборки узла в сеть Петри, а также описывается один из вариантов организации такого преобразования, используемый в реализуемой системе. Предлагается реализация системы моделирования и верификации процесса сборки на основе поставленных задач и рассмотренных алгоритмов.

Ключевые слова: *системно-технический объект сборки, сборка, селективный/теоретико-вероятностный метод сборки, верификация, сети Петри.*

Введение

В настоящее время предприятия авиационной отрасли должны постоянно сокращать длительность технической подготовки производства как одной из стадий жизненного цикла изделия для того, чтобы успешно и эффективно конкурировать на рынке, предлагая наиболее передовые образцы продукции. Для этого требуются сокращение сроков поставок, уменьшение текущих расходов, оптимальное использование производственных мощностей, оптимизация материальных и информационных потоков. При этом наблюдаются тенденции развития производственных структур в направлении гибкого автоматизированного производства (ГАП) и повышения роли автоматизированных систем (CAD/CAM/CAPP/MPM/PLM) в подготовке к возможно скорейшему выходу продукта на рынок [1].

Современный процесс производства деталей для авиационной техники, а также различных устройств представляет собой совокупность действий, выполняющихся поэтапно на всех этапах жизненного цикла, связанных с производством. К таким действиям относятся моделирование изделия, проектирование технологических процессов (ТП) изготовления отдельных деталей, сборочных технологических процессов, разработка технологической оснастки, специнструментов, техническое нормирование производственных операций, планирование загрузки производственных мощностей, материально-технического обеспечения производства, а также другие аспекты производственного процесса.

Сокращение сроков выхода продукции на рынок при поддержании конкурентоспособных харак-

теристик ее качества и себестоимости возможно в случае сокращения сроков технической (в частности, технологической) подготовки производства при условии гарантированного обеспечения надежности технологических процессов по всем выполняемым операциям, сокращении производственных рисков и применении эффективных методов анализа и моделирования производственных процессов с целью выявления и своевременного устранения производственных рисков на ранних стадиях технологической подготовки производства (ТПП).

Применение подобных систем моделирования, визуализации и верификации процессов сборки является очень востребованным вследствие возросшей степени автоматизации производственного процесса и высоким требованиям качества, предъявляемым к создаваемым деталям, изделиям и устройствам.

В данной работе рассматривается задача, связанная с процессом симуляции (программного моделирования) и верификации результатов процесса сборки [2]. Система моделирования и верификации позволяет моделировать технологические процессы сборки, проводить верификацию сборочного процесса, анализировать собираемость изделия, оценивать производственные ресурсы, используемое оборудование, инструмент и приспособления, рассчитывать временные характеристики технологических операций сборки [3]. Такие системы, включенные в состав систем PLM, тесно взаимодействуют с различными CAD системами (такими как AutoCAD, T-flex CAD, SolidWorks, CATIA и др.), САПР ТП/CAPP (такими как ТехноПро, Вертикаль, Timeline), различными базами данных, PDM систе-

мами (Simatic PDM, ENOVIA Smarteam и др.).

Наиболее удобным и рациональным способом представления логики сборочного процесса являются теория графов и сетей Петри [4, 5]. Актуальность представленной задачи демонстрируют многочисленные публикации по теме моделирования конструкции сборочной единицы и технологической схемы сборки-разборки [6, 7], а также switch-технология [8] для логического управления технологическими процессами сборочного производства [9].

В процессе сборки для осуществления верификации применяются различные методы сборки, такие как: «Сборка методом полной взаимозаменяемости», «Селективная сборка», «Теоретико-вероятностный метод», «Сборка с пригонкой», «Сборка с применением компенсационных звеньев», «Сборка с применением компенсационных материалов» [10].

Виды сборки можно классифицировать следующим образом:

1. По объекту сборки:

- узловая;
- общая.

2. По последовательности сборки:

- последовательная;
- параллельная;
- последовательно-параллельная.

3. По стадиям сборки:

- предварительная;
- промежуточная;
- окончательная.

В данной работе рассматривается система верификации и моделирования для симуляции процесса сборки, анализа и проверки посредством поэтапного моделирования, и проверки соответствия собираемого системно-технического объекта сборки указанным спецификациям [11, 12].

1. Постановка задачи исследования

Рассмотрев спектр решаемых производственных задач и проблемы, связанные с их решением, необходимо разработать приложение, представляющее реализацию комплекса возможностей по моделированию процесса сборки изделия и проверки правильности результатов выполнения этого процесса. При решении данной проблемы необходимо рассмотреть следующие задачи:

– симуляцию процесса сборки, выполняемой в соответствии с технологической схемой сборки (ТСС);

– выполнение предварительной проверки используемых элементов сборки, верификации сборочного процесса на каждом его этапе, а также верификации конечного результата моделируемой

сборки;

– представление результатов программного моделирования и верификации сборки в удобной для последующего анализа форме.

Таким образом, в этой статье ставятся целью разработка системы верификации и моделирования технологического процесса сборки на основе проведенного анализа применяемых в производстве методов сборки, алгоритмов моделирования (симуляции) сборочного процесса и верификации правильности его выполнения.

2. Анализ используемых алгоритмов моделирования

Для решения задачи моделирования используется алгоритм, основанный на преобразовании схемы сборки в сеть Петри. Поскольку объектом моделирования в данном случае являются не только связи между элементами, но и одновременно протекающие во времени и взаимосвязанные процессы, необходимо применить модель особого рода: структурно-функциональную, одновременно отражающую структуру и функционирование моделируемого объекта. Одним из оптимальных вариантов создания математической модели в данном случае является применение графов. Наиболее универсальным методом работы с графами можно считать теорию сетей Петри – эффективный инструмент моделирования дискретных процессов. Их основные особенности – возможность отображать параллелизм, асинхронность, иерархичность моделируемых объектов более простыми средствами, чем при использовании других средств моделирования [3, 4, 5].

Для задачи верификации используются методы селективной сборки и теоретико-вероятностный метод. Они обеспечивают точность сборки равную той, которая требуется пользователем и обусловлена спецификациями изготавливаемого изделия.

Удобство представления результатов выполняется за счет использования системы моделирования процессов реального времени. Таким образом, пользователь будет иметь возможность отслеживать процесс выполнения моделирования в каждый момент времени.

Проектирование технологического процесса сборки включает два этапа:

первый этап – разработка схемы сборки, содержащей информацию о порядке присоединения элементов изделия, комплектности сборочных единиц и соединений.

второй этап – разработка операций, определение состава присоединяемых элементов, видов работ, средств и других параметров, образующих описание сборочных операций [6, 7].

Творческий процесс анализа конструкции сборочной единицы и разработки схемы сборки, в которой зафиксирована в сжатом виде информация о сборочной единице и технологическом процессе сборки, является наиболее трудоемким и трудно формализуемым. В дальнейшем, построенная схема сборки может служить непосредственно для анализа протекания процесса сборки во времени, но более рациональным является применение специального вида моделей – сетей Петри.

2.1. Применение сети Петри

Сеть Петри (СП) называется двудольный ориентированный граф

$$N = \langle P, T, * \rangle,$$

где $P = \{P_i\}$, $T = \{t_j\}$ – конечные непустые множества вершин, называемые соответственно позициями (места) и переходами; $*$ – отношение между вершинами, соответствующее дугам графа [8].

Позиции изображаются кружками, а переходы черточками (палочки). Дуги соединяют кружки с черточками и черточки с кружками, но не однотипные вершины между собой.

Маркировкой сети Петри называется функция Φ , которая каждой позиции ставит в соответствие целое неотрицательное число. Маркировка характеризуется вектором

$$\Phi = \langle \Phi(P_1), \dots, \Phi(P_n) \rangle,$$

где n – число позиций сети Петри. В графическом изображении маркировке Φ соответствует размещение меток (точки, маркеры, фишки) в позициях сети. При этом число меток в позиции P_i равно $\Phi(P_i)$.

Различные маркировки сети Петри характеризуют состояния соответствующей ей динамической системы, причем динамика изменений состояний моделируется движением меток по позициям. Маркировка сети может изменяться при срабатывании ее переходов.

Если каждая из входных позиций перехода t_j содержит, по меньшей мере, одну метку, то переход t_j – может сработать (возбужден). При срабатывании перехода из каждой его позиции удаляется одна метка, а в каждую выходную позицию добавляется одна метка.

Основное достоинство сетей Петри состоит в возможности отображения в виде одной компоненты взаимодействия нескольких параллельно-последовательных процессов, а их недостаток заключается в том, что они не описывают в явном виде поведение – динамику смены состояний. Сети

Петри в некотором смысле аналогичны мостиковым контактными схемам, для которых описание их структуры отличается от описания их поведения.

Сложность анализа поведения сетей Петри состоит в том, что приходится одновременно следить за положением нескольких точек и запоминать эти ситуации. Поведение сети Петри в явном виде описывается с помощью графа достижимых маркировок, который в некотором смысле аналогичен эквивалентной параллельно-последовательной схеме (П-схема), построенной по заданной мостиковой схеме. Основное достоинство П-схем, определившее их широкое применение, состоит в том, что для каждой из них структура и поведение могут быть описаны одной и той же булевой формулой, что позволяет выполнить ее формальные преобразования с целью упрощения структуры без изменения поведения [8].

Пример. Рассмотрим сборочный эскиз узла (рисунок 1) и последовательность сборки его компонентов (рисунок 2 и 3). Технологический процесс сборки представляет собой документ, описывающий эскиз собираемого изделия, комплект входящих в него компонент и используемого инструмента, а также последовательность применяемых сборочных операций и требования к ним.

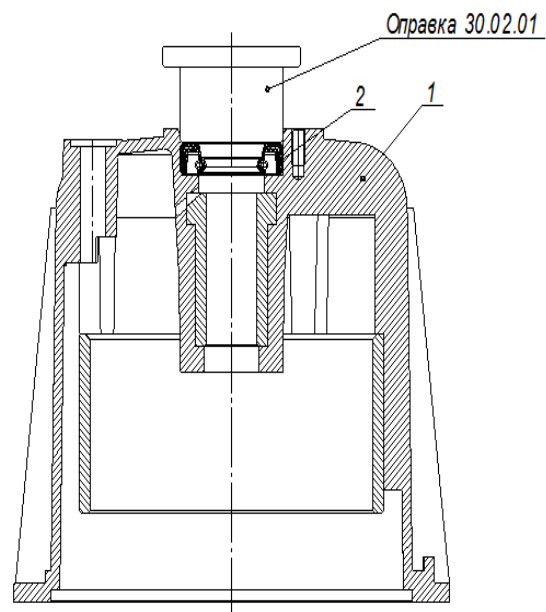


Рис. 1. Эскиз сборочной единицы

В соответствии с технологическим процессом, все компоненты составляющие сборку описаны в комплекточной карте (КК) (рисунок 2), а последовательность операций, связанная с их добавлением в состав сборки изделия указана в операционной карте (ОК) (рисунок 3).

Применение теории графов и сетей Петри состоит в том, что необходимо представить технологический процесс в удобном для последующего моделирования и верификации виде. Поскольку для каждого компонента при включении его в состав сборки существует четко обозначенный ряд необходимых сборочных операций, то при построении сети каждому узлу сопоставляется соответствующий ему компонент и ряд связанных операций, а каждой стрелке сопоставляется технологический переход между операциями. Последовательность этапов сборки определяется последовательностью вхождения в нее составных компонент.

Корпус верхний								
Н.контр.	К/М	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Поз.	Наименование	Обозначение
01	2	1	015	1			Корпус верхний СБ	ТЭ.30.02.01.00.00
02	2	1	015	2			Манжета 2,1-20-40-4	ГОСТ 8752-79
03	2	1	015				Тара (деревянный ящик)	
04								
05	2	2	020	3			Шайба тарельчатая	ТЭ.30.02.04.00.00
06	2	2	020	4			Сальник	ТЭ.30.02.03.00.00
07	2	2	020	5			Крышка сальника	ТЭ.30.02.02.00.00
08	2	2	020	6			Шайба 5.65Г.019	ГОСТ 6402-70
09	2	2	020	7			Винт В М5-6х16.48.019	ГОСТ 17473-80
10								

Рис. 2. Комплекточная карта сборки узла

Таким образом, при прохождении транзакции по сети, выполнение следующей сборочной операции является невозможным, если не выполнены все операции предшествующие данной, тем самым обеспечивается сохранение последовательности операций и последовательности добавления компонент в сборку.

Стоп СД 3702.09									
Р	ПМ	Д или В	L	t	i	S			
001	1. Проверить комплектность заготовок и ознакомиться с технологической документацией.								
002	2. Установить шайбу тарельчатую ТЭ.30.02.04.00.00 поз.3 на манжету поз.2 согласно эскиза								
003	3. Установить сальник ТЭ.30.02.03.00.00 поз.4 в крышку сальника ТЭ.30.02.02.00.00 поз.5 согласно эскиза								
004	эскиза								
005	4. Установить крышку сальника с сальником на корпус, совместить крепежные отверстия.								
006	5. Установить шайбы поз.6 и винты поз.7 в крепежные отверстия корпуса.								
007	6. Вернуть винты в корпус. Затяжку производить последовательно, наращивая момент затяжки до 2Нм								
008	2Нм								
009	Резьб. маш. МРЗ-10								
010	7. Контролировать стык крышки сальника и корпуса визуально. Раскрытие стыка не допускается. В случае раскрытия стыка дотянуть винты.								
011									
012									
013									

OK | Операционная карта

Рис. 3. Операционная карта для сборки узла

Синтез графа сети Петри производится сверху-вниз, от конечной сборки к составляющим ее элементам. В процессе верификации, граф обходится снизу-вверх, в соответствии с последовательностью

добавления компонент к конечной сборке. Примечательно то, что компонент текущей сборки может быть как простым, так и комплексным, представляющим собой подсборку для данной сборки. В приведенном примере, такими компонентами являются Корпус СБ (ТЭ 30.02.01) и Корпус (ТЭ 30.02.01.01). В таком случае проводится композиция и синтез подграфа, который потом входит в граф основной сборки. Таким образом, результирующий граф, представленный на рисунке 4, может иметь несколько уровней вложенности, в зависимости от количества подборок в составе основной сборки. В дальнейшем работа построенной сети Петри может быть применена для компьютерного моделирования [9].

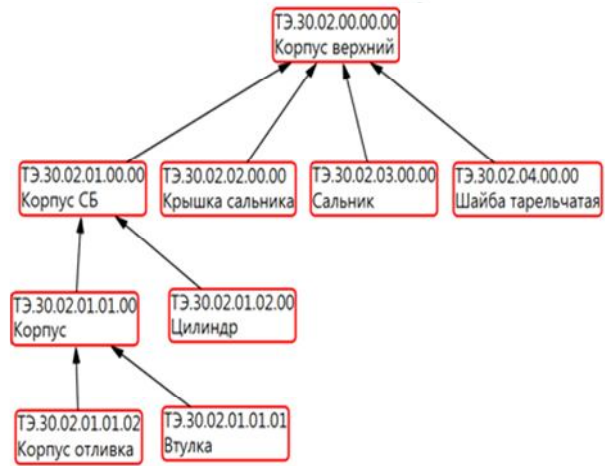


Рис. 4. Результирующий граф схемы сборочного процесса

2.2. Метод селективной сборки

Сущность метода заключается в том, что детали, изготовленные с расширенными допусками, перед сборкой сортируются на группы по заранее установленным градациям размеров. Сборку деталей производят только в тех сочетаниях, которые обеспечивают заданную точность сборочного размера.

Этот метод также применяется, если выбор другого оборудования для обеспечения требуемой точности экономически не эффективен (по сравнению с селективной сборкой) [10].

Метод селективной сборки позволяет получать высокую точность сборочного размера, однако для него требуется полный контроль деталей по контролируемому параметру перед сборкой.

На рисунке 5 представлен вариант, когда все получаемые детали разбиваются на три группы. Точность сборки увеличивается во столько раз, на сколько групп разбиваются все получаемые детали.

Основным преимуществом в применении данного метода является его универсальность и высокие показатели точности при обеспечении сборки. К недостаткам же, в сравнении с теоретико-вероятностным методом, можно отнести необходимость полного контроля деталей по параметрам, учитываемым перед их соединением.

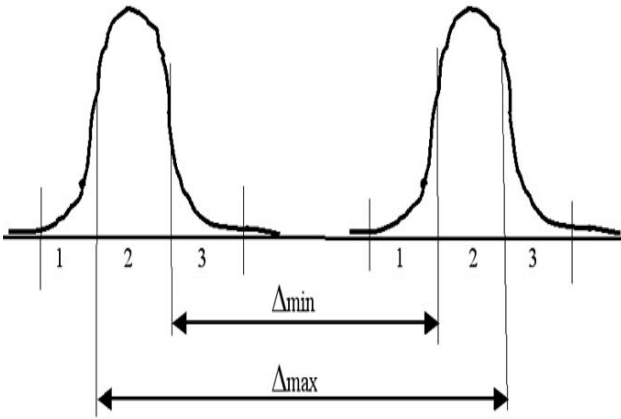


Рис. 5. Разбиение кривой распределения размеров деталей на группы

2.3. Теоретико-вероятностный метод сборки

Метод означает, что используется знание закона распределения фактических размеров в пределах поля допуска (рисунок 6).

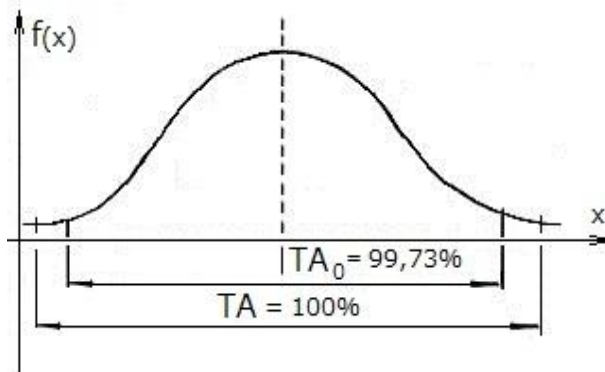


Рис. 6. График функции распределения размеров в пределах поля допуска

Метод применяется, когда допуск на требуемый параметр меньше, чем получается на оборудовании. Тогда разработчик может разрешить изготавливать детали, но при этом часть деталей уйдет в брак. Таких деталей будет всего 0,27% от всего объема изготавливаемых деталей.

Следует учесть, что брак бывает исправимый и неисправимый. Метод требует 100% проверки деталей перед сборкой [10].

Формула для расчёта величин допусков при использовании метода неполной взаимозаменяемости имеет следующий вид:

$$TA_0 = t_0 * \sqrt{\sum_{i=1}^m \lambda_i^2 * (TA_i)^2}, \quad (1)$$

где t_0 – коэффициент риска, определяющий процент выхода получаемых значений замыкающего звена за требуемые пределы установленного допуска TA_0 .

Величину λ_i^2 рассчитывают, выбирая закон рассеяния для описания распределения каждого составляющего звена.

Ввиду принятых допущений формула (1) является приближённой, причём степень приближения возрастает с увеличением числа звеньев m . Из формулы (1) можно рассчитать средний допуск составляющего звена:

$$TA_{cp} = \frac{TA_0}{t_0 * \sqrt{\lambda_i^2 - m}}. \quad (2)$$

С достаточной для практики точности формулой (2) можно пользоваться:

- если составляющие звенья распределены по закону Гаусса при $m \geq 2$;
- если составляющие звенья распределены по закону треугольника при $m \geq 4$;
- если составляющие звенья распределены по закону равной вероятности при $m \geq 6$.

Исходя из анализа данного метода, его основным преимуществом в сравнении с селективным методом является возможность быстрого приближительного анализа допусков всех деталей сборки. Недостатком метода является невысокая точность и как следствие этого – большая вероятность наличия брака деталей сборки.

2.4. Дополнительные методы сборки

Существует также несколько дополнительных методов сборки, которые, как правило, применяются намного реже, чем перечисленные ранее методы селективной сборки и теоретико-вероятностный метод. Такими методами являются:

- метод полной взаимозаменяемости;
- метод сборки с пригонкой;
- метод сборки с применением компенсационных звеньев.

Метод полной взаимозаменяемости применяется исключительно при высокотехнологичных сборках. При этом методе процесс сборки сводится к

соединению деталей без проведения какой-либо обработки. Получаемая, таким образом, высокая точность получаемой сборки выражается в достаточно существенном росте себестоимости компонентов сборки.

При использовании метода сборки с пригонкой, требуемая точность достигается путем снятия слоя материала с заранее определенной конструктором поверхности детали. Преимущество данного метода: обеспечивает требуемую точность при неточном изготовлении и при большой накопленной погрешности сборочной цепи. Недостатки: необходимость введения доработки деталей при сборке. Метод применяется в серийном и мелкосерийном типе производства.

Для метода с применением компенсационных звеньев, требуемая точность собираемого изделия достигается путем изменения величины заранее установленного компенсирующего звена (детали) без снятия с него слоя материала. Для этого применяют следующие способы: изменение положения одной из деталей путем ее линейного перемещения или поворота, введение в соединение (в размерную цепь) неподвижного компенсатора, требуемого размера или с требуемыми относительными поворотами его поверхностей. Как следствие, установленная точность достигается путем усложнения конструкции.

3. Проектирование системы верификации и моделирования технологического процесса сборки

В результате проведенного анализа применяемых в производстве методов сборки, алгоритмов моделирования и методов обеспечения точности принято решение о создании автономного приложения, обладающего возможностями, представленными на рисунке 7. При этом исходными данными для приложения являются результаты работы САПР ТП/САРР, представленные в формате XML (что позволит снизить зависимость от конкретно применяемой САПР путем экспорта данных о ТП сборки из базы данных системы в универсальный формат).

Для обеспечения решения представленных задач предполагается динамическое создание структуры сети Петри конкретной верифицируемой сборочной единицы путем парсинга импортируемого файла XML с данными о ТП сборки.

Непременным условием для верификации, помимо описанного взаимодействия с САПР ТП/САРР-системами является тесное взаимодействие с САД-системой, использование ее средств визуализации через функции API приложения. В каче-

стве среды геометрического моделирования выбрана САД-система SolidWorks, как располагающая наиболее богатым API-интерфейсом своего мощного графического ядра Parasolid.

Для верификации, анализа и моделирования процесса сборки необходимо иметь твердотельные модели всех деталей и узлов, входящих в состав сборочной единицы, для которой верифицируется ТП сборки. Помимо этого необходимы твердотельные модели технологической оснастки, вспомогательного, измерительного и слесарно-сборочного инструмента, используемого в ТП сборки. Возможность для организации графической базы данных системы также предоставляет среда SolidWorks путем ее реализации в виде файловой структуры «Библиотеки проектирования» с созданием упорядоченного индекса элементов, доступного для разрабатываемой системы.



Рис. 7. Задачи, решаемые разрабатываемой системой

Основой, шаблоном для структуры данных системы является технологическая схема сборки (ТСС), представляющая собой графическую интерпретацию структуры изделия.

Для удобного представления данных следует учитывать также структуру технологического процесса, основным элементом которого является технологическая операция, а основным элементом технологической операции является технологический переход.

Таким образом, имеем двухуровневую структуру данных, верхний уровень которой представляет собой маршрут ТП. Его линейность или разветвленность определяется именно топологией ТСС, кото-

рая, в свою очередь, является производной от состава изделия, определяемого спецификацией на изделие. Нижний уровень данных определяет состав операции. Буквально – последовательность выполняемых технологических переходов, которые принято подразделять на основные и вспомогательные.

Однако учитывая то, что основной переход представляет собой технологический объект, состоящий из конструктивного элемента (детали или узла применительно к сборочным ТП) и выполняемого над ним действия, подобно грамматической конструкции любого языка, описывая объект и действие над ним.

В связи с этим становится очевидным возможность и необходимость представления задачи не на уровне структуры данных, а на уровне структуры объектов, обладающих собственными свойствами и методами, а также событиями, возникающими по мере развития процесса.

Систематизировав, таким образом, информационное пространство, имеем возможность представить его структуру в двойственном виде: с одной стороны, топология задачи определяется формализмом сетей Петри, управляемых маркерами-событиями, а с другой стороны имеем компонентно-ориентированную структуру данных и связанных с ними методов, что особенно четко проявляется на уровне моделирования операции, где методами являются:

- функции анализа размерных цепей;
- анализ операции сборки селективным методом;
- анализ операции сборки методом полной взаимозаменяемости;
- анализ операции сборки теоретико-вероятностным методом;
- выбор наиболее экономически оправданного метода обеспечения точности;
- анализ интерференции деталей и узлов сборки;
- анализ интерференции сборочной единицы и применяемого сборочного и измерительного инструмента, приспособлений и оснастки;
- анализ норм времени на выполнение операций;
- функции проверки структуры сборочной единицы;
- анализ достижимости выполнения текущей операции и соответствия ТСС, и пр. методы.

В качестве примеров возникающих событий можно привести:

- события достижения требований операции (условие перехода в сети Петри);
- возникновение брака сборки по точности;
- интерференцию компонентов;

- интерференцию сборки и инструмента;
- невозможность обеспечения заданного усилия сборки и пр.

Таким образом, двойственная информационная структура является древовидной (не реляционной) на верхнем уровне, и имеющей регулярную структуру компонентов, обладающих всеми признаками объектно-ориентированного подхода на нижнем уровне, представляющем операции. Причем события, возникающие на нижнем уровне, являются управляющими маркерами для верхнего уровня модели.

На графической схеме взаимодействия компонент (рисунок 8) представлены преобразование получаемых компонент в выходные данные в процессе выполнения основных операций системы.

Входными компонентами для системы являются техпроцесс сборки и файл проектируемой сборки SolidWorks.

На выходе получаем отчет о проведенной верификации и граф техпроцесса сборки.

Все выполняемые операции фиксируются и записываются в лог-файл системы, в зависимости от результата их выполнения, что позволяет легко отследить на каком этапе в процессе верификации возникла ошибка.

Важным достоинством подхода, принципы которого описаны в [11, 12], является возможность верификации сборки различных вариантов изделия, представленных различными исполнениями в терминах ТП сборки и конструкторской документации, конфигурациями в терминах среды SolidWorks, или иными объектами класса в терминах разрабатываемой системы благодаря полиморфизму как одному из фундаментальных свойств компонентно-ориентированного подхода.

Помимо этого, данный подход открывает широкие возможности для применения в проектировании технологий сборки компонент повторного использования (КПИ), сокращающих сроки ТПП, снижающих производственные риски и себестоимость изделий [11, 12].

Система предусматривает два сценария проведения верификации модели: положительный и отрицательный.

В случае отрицательного сценария пользователь получит отчет о проведенном анализе с указанием ошибки, которая была обнаружена при попытке собрать данную сборку. Эта ошибка будет указывать на невозможность создания изделия в соответствии с требованиями к сборке и будет учтена при доработке технологического процесса.

В случае положительного сценария результатом работы системы является пооперационно собранная модель изделия и отчет системы о результа-

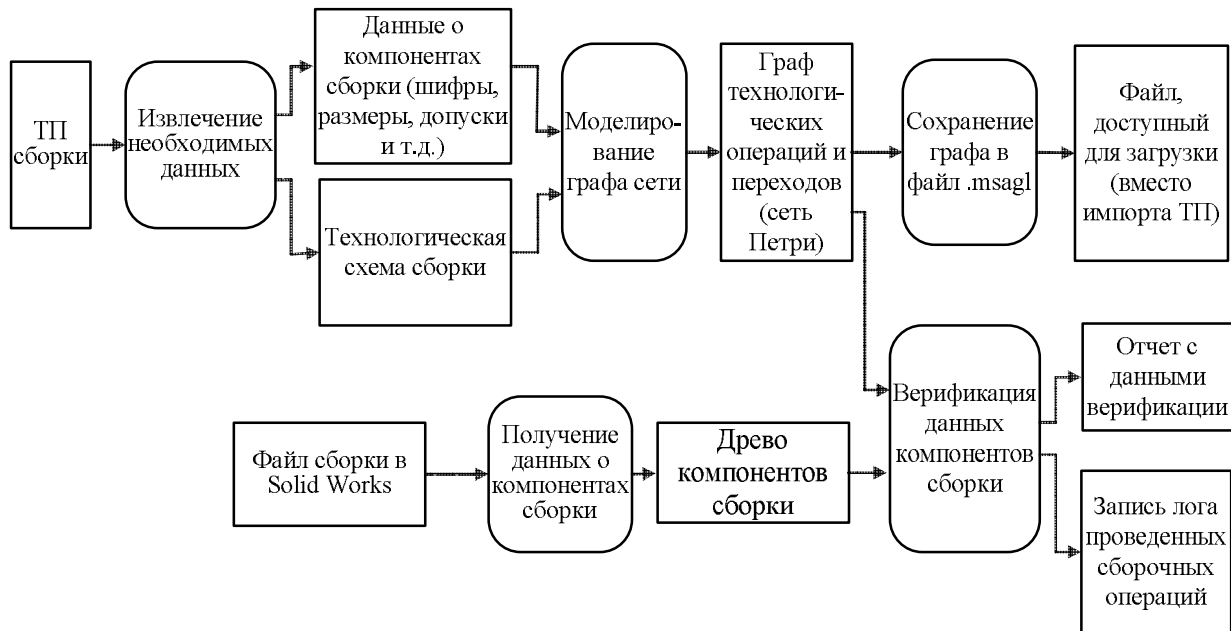


Рис. 8. Взаимодействие программных компонент

тах проведенной верификации модели с количественными характеристиками процесса, достигнутыми при сборке.

Принцип работы системы наиболее наглядно демонстрирует разработанный алгоритм ее функционирования, представленный в виде схемы, показанной на рисунке 9.

Разработанная система представляет собой дополнение, созданное для работы совместно со средой SolidWorks. Система использует представленные возможности средств SolidWorks API, предназначенные для моделирования и визуализации процессов.

Когда сборка в SolidWorks загружена и необходимые данные о сборке и ее компонентах извлечены из ТП сборки, происходит процесс генерации графа состояний и переходов, идентичный графам сети Петри. Каждый узел графа соответствует ряду операций, проводимых для добавления компонента в качестве элемента текущей сборки. Каждая стрелка соответствует технологическому переходу, представляя, таким образом, последовательность добавления компонент в сборку.

Процесс верификации шифров изделий проводится одновременно с обходом полученного графа (рис. 10). По окончании выполнения процесса верификации сборки, пользователь получает отчет об успешном, либо неуспешном выполнении ее моделирования.

При этом результат выполнения верификации каждой операции для каждого компонента записывается в лог, что позволяет отследить, какой параметр для данного компонента не соответствует спецификациям технологического процесса.

Успешно прошедшую проверку сборку можно использовать в качестве компонента для сборки более высокого уровня. Подобное применение позволяет ускорить сборочный процесс особенно при сложном, комплексном производстве. Прошедшая проверку сборка является уже, по сути, готовой визуальной инструкцией по сборке на производстве.

Также удобной является функция составления списка использованных при сборке инструментов. Это позволяет ускорить процесс сборки и продумать наиболее оптимальную схему сборки на сборочных линиях при массовом производстве.

Заключение

В работе подробно рассмотрены вопросы моделирования и верификации процесса сборки, приведено сравнение селективного и теоретико-вероятностного метода сборки, рассмотрены дополнительные применяемые методы сборки, выявлены их преимущества и недостатки.

Рассмотрено применение сетей Петри и компонентно-ориентированного подхода для моделирования, анализа и верификации технологического процесса сборки. Предложен алгоритм работы и разработана программная система верификации и моделирования технологического процесса сборки.

Литература

1. Гребенников, А. Г. *Методология интегрированного проектирования и моделирования сборных самолетных конструкций [Текст] / А. Г. Гребенников. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 532 с.*

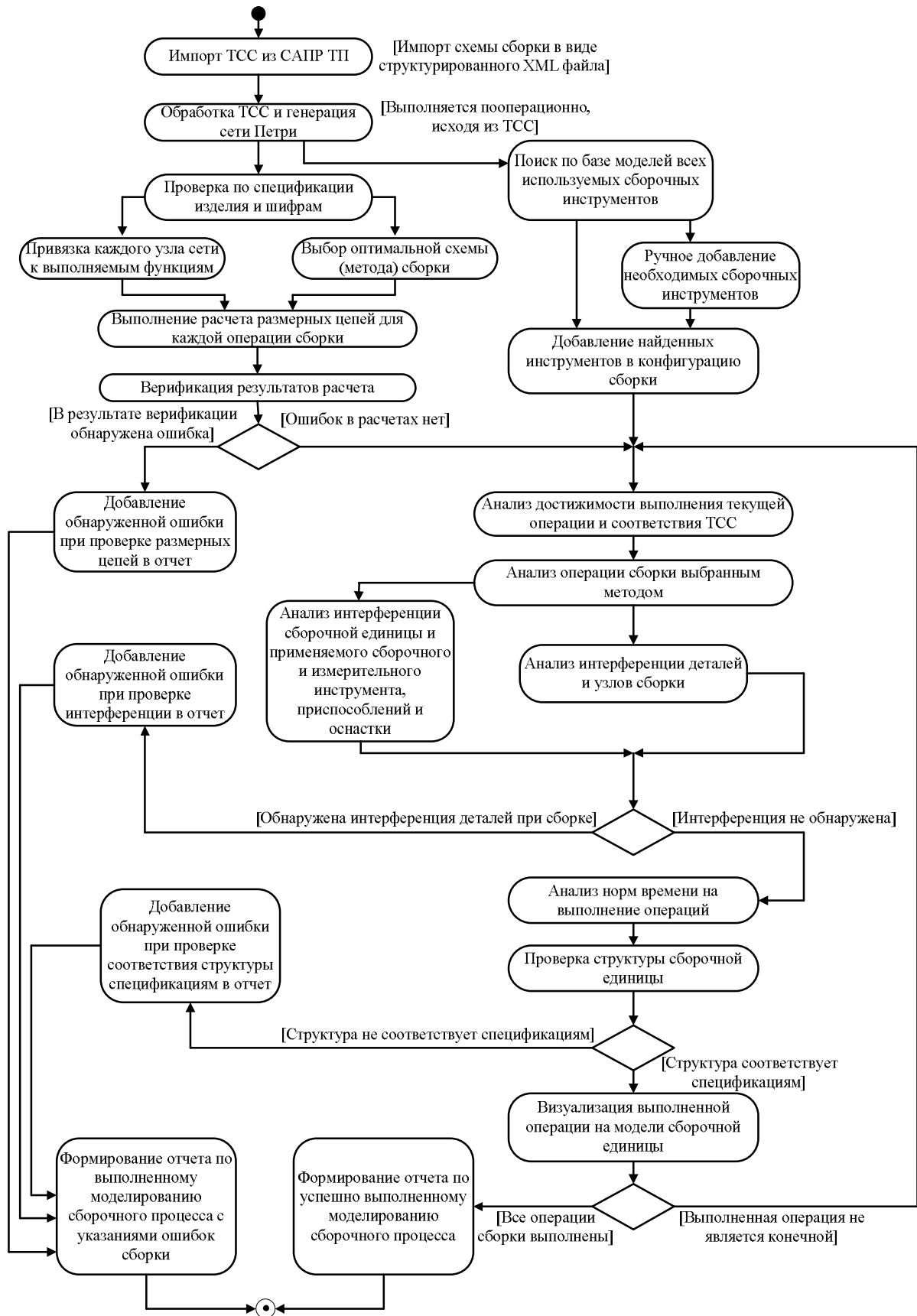


Рис. 9. Алгоритм работы проектируемой системы

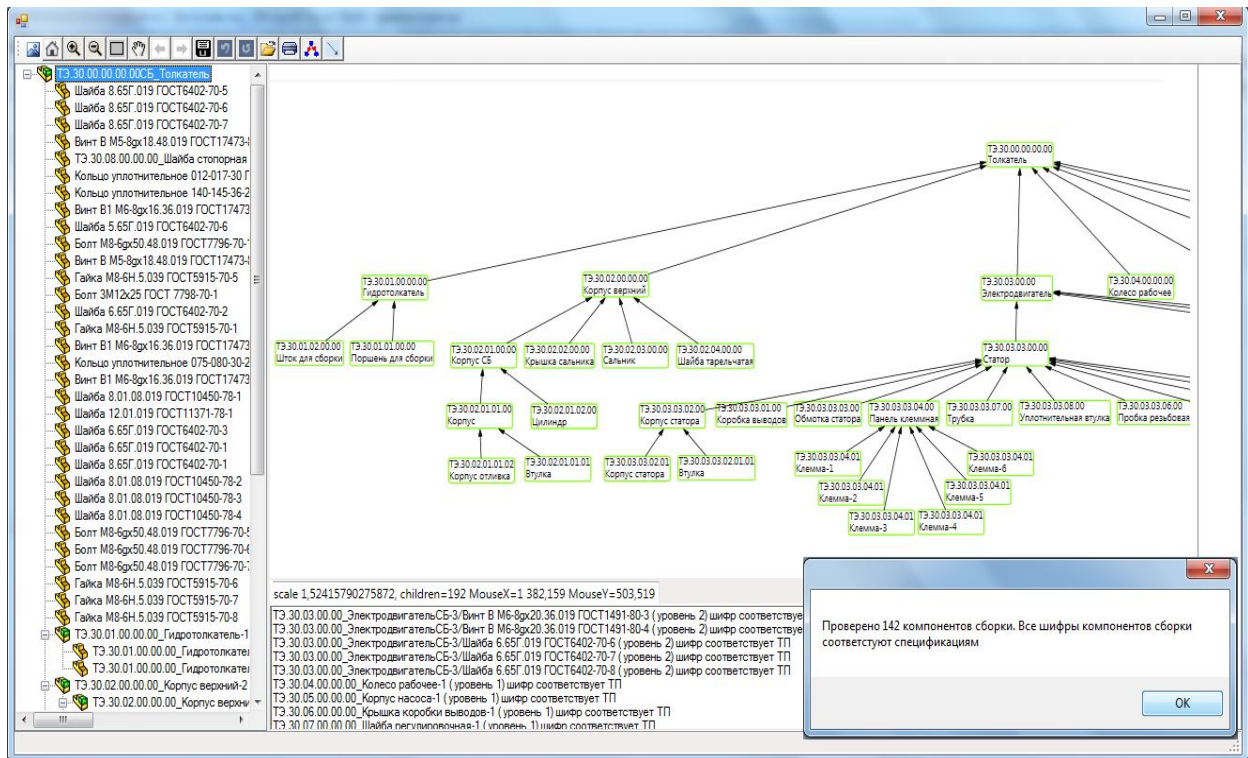


Рис. 10. Экранная форма отчета по успешно выполненному моделированию сборочного процесса

2. North, M. J. *A Declarative Model Assembly Infrastructure for Verification and Validation* [Text] / M. J. North, T. R. Howe, N. T. Collier // *Advancing Social Simulation: The First World Congress, 2007*. – P. 129-140.

3. Bergstra, J. A. *Real time Process Algebra* [Text] / J. A. Bergstra, J. C. Baeten // *Formal Aspects of Computing – 1991*. – Vol. 3. – P. 142-188.

4. Питерсон, Дж. *Теория сетей Петри и моделирование систем* [Текст] : Пер. с англ. / Дж. Питерсон. – М. : Мир, 1984. – 264 с.

5. Мартынов, В. Г. *Применение сетей Петри при моделировании схемы сборки* [Текст] / В. Г. Мартынов, В. Б. Масыгин // *Современные проблемы машиностроения : сб. науч. тр. VII Межд. науч.-техн. конф.; под ред. А. Ю. Арляпова, А. Б. Кима*. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – С. 323-327.

6. Масыгин, В. Б. *Моделирование конструкции сборочной единицы и технологической схемы сборки при помощи графов* [Текст] / В. Б. Масыгин // *Прикладные задачи механики : сб. науч. тр. ; Под ред. В.В. Евстифеева*. – Омск : изд-во ОмГТУ, 1999. – С. 130-134.

7. Гамаюн, И. П. *Разработка алгоритма сборки - разборки сложной технической системы на основе положения двойственности ее подсистем* [Текст] : учеб. пособие / И. П. Гамаюн. – Х. : НТУ "ХПИ", 1999. – 26 с.

8. Шальто, А. А. *Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления* [Текст] : учеб. пособие / А. А. Шальто. – СПб. : Наука, 1998. – 628 с.

9. Мартынов, В. Г. *Применение сетей Петри при моделировании управления технологическими процессами сборочного производства* [Текст] / В. Г. Мартынов, В. Б. Масыгин // *Омский научный вестник. Серия «Приборы, машины и технологии»*. – 2014. – С. 134-137.

10. Соболев, С. Ф. *Разработка технологических процессов сборки приборов оптоэлектронной электроники. Методические указания*. [Электронный ресурс] / С.Ф. Соболев. – Режим доступа: http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=1&tutindex=41&index=1&layer=1. – 26.11.2015 г.

11. Сергеева, Ю. И. *Компонентная технология управления проектами создания наукоемких изделий машиностроения* [Текст] / Ю. И. Сергеева, С. С. Плохов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – №3 (29). – С. 65-70.

12. Сергеева, Ю. И. *Компонентно-ориентированный подход проектирования технологических процессов создания сложной техники* [Текст] / Ю. И. Сергеева. // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»*. – 2014. – Вып. 66. – С. 47-52.

References

1. Grebennikov, A. G. *Metodologiya integrirovannogo proektirovaniya i modelirovaniya sbornykh samoletnykh konstruksii* [Methodology of integrated design and modeling of assembled aircraft structures]. Kharkov, NAU "KhAI" Publ., 2006. 532 p.
2. North, M. J., Howe, T. R., Collier, N. T. A Declarative Model Assembly Infrastructure for Verification and Validation. *Advancing Social Simulation: The First World Congress*, 2007, pp. 129-140.
3. Bergstra, J. A., Baeten, J. C. Real time Process Algebra. *Formal Aspects of Computing*, vol. 3, 1991, pp. 142-188.
4. Peterson, J. L. *Petri net theory and modeling of system*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, Inc, 1981. 302 p. (Russ. ed.: Piterson, Dzh. *Teoriya setei Petri i modelirovanie sistem*. Moscow, Mir Publ., 1984. 264 p.)
5. Martynov, V. G., Masyagin, V. B. Primenenie setei Petri pri modelirovanii skhemy sborki [Application of Petri nets in circuit assembly modeling]. *Trudy 7 Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye problemy mashinostroeniya"* [Proc. 7th Int. Sci. Conf. "Modern mechanical engineering problems"]. Tomsk, 2013, pp. 323-327.
6. Masyagin, V. B. Modelirovanie konstruksii sborochnoi edynitsy i tekhnologicheskoi skhemy sborki pri pomoshchi grafov [Assembly units and technological assembly scheme construction simulation using graphs]. *Trudy OmGTU «Prikladnye zadachi mekhaniki»* [Proc. of OmGTU "Applied problems of mechanics"]. Omsk, 1999, pp 130-134.
7. Gamayun, I. P. *Razrabotka algoritma sborki - razborki slozhnoi tekhnicheskoi sistemy na osnove polozeniya dvoistvennosti ee podsistem* [The development of an algorithm of assembly - disassembly of complex technical system based on the provisions of its subsystems duality]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 1999. 26 p.
8. Shalyto, A. A. *Switch-tehnologiya. Algoritmi-zatsiya i programmirovaniye zadach logicheskogo upravleniya*. [Switch-technology. Algorithmization and programming logic control tasks]. SPb, Nauka Publ., 1998. 628 p.
9. Martynov, V. G., Masyagin, V. B. Primenenie setei Petri pri modelirovanii upravleniya tekhnologicheskimi protsessami sborochnogo proizvodstva [Application of Petri nets in modeling of assembly production process control]. *Omskii nauchnyi vestnik. Seriya «Pri-bory, mashiny i tekhnologii»* [Omsk Scientific Bulletin. "Devices, machines and technology" serie]. Omsk, 2014, pp 134-137.
10. Sobolev, S. F. *Razrabotka tekhnologicheskikh protsessov sborki priborov optoelektromekhatroniki. Metodicheskie ukazaniya*. [Optoelectromechatronics devices assembly technological processes development. Methodical instructions]. Available at: http://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=1&tutindex=41&index=1&layer=1 (accessed 26.11.2015).
11. Sergeeva, Yu. I., Plokhov, C. C. Komponentnaya tekhnologiya upravleniya proektami sozdaniya naukoemkikh izdelii mashinostroeniya [Project management component technology for creating high-tech mechanical engineering products]. *Aerospace Engineering and Technology*, 2006, no. 3(29), pp. 65-70.
12. Sergeeva, Yu. I. Komponentno-orientirovannyi podkhod proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov sozdaniya slozhnoi tekhniki [Component-oriented approach to design of complex equipment creating technological process]. *Trudy NAU KhAI Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii* [Proc. of the NAU "KhAI" "Open information and computer integrated technologies"], 2014, vol. 66, pp. 47-52.

Поступила в редакцію 18.02.2016, рассмотрена на редколлегии 14.04.2016

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ВЕРИФІКАЦІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗБІРКИ

А. В. Попов, М. О. Момот, Е. С. Сергеев

Проводяться виявлення завдань, вирішенням яких займаються сучасні програмні комплекси на виробництві. Здійснюється аналіз методів проведення збірки, а саме селективний і теоретико-імовірнісний методи, наводяться приклади реалізації розглянутих алгоритмів на основі використання мережі Петрі. Розглядається механізм перетворення схем складання вузла в мережу Петрі, а також описується один з варіантів організації такого перетворення, використовуваний в реалізованій системі. Пропонується реалізація системи моделювання та верифікації процесу складання на основі поставлених завдань і розглянутих алгоритмів.

Ключові слова: системно-технічний об'єкт збірки, збірка, селективний / теоретико-імовірнісний метод складання, верифікація, мережі Петрі.

**DEVELOPMENT OF THE SYSTEM FOR VERIFICATION AND MODELING
OF ASSEMBLY TECHNOLOGY PROCESS***A. V. Popov, M. A. Momot, E. S. Sergyeyev*

Conducted identify problems dealt with by the modern software systems in production. The analysis methods for performing the assembly process, namely, selective and theoretically-probabilistic methods and considered examples of algorithms based on the use of Petri nets. Examines the mechanism conversion of assembly schemes in Petri net, and describes one of the options for such a transformation used in the implemented system. Proposed implementation of the system simulation and verification of the build process on the basis of tasks and considered algorithms.

Keywords: system-technical assembly object, assembly, selective / theoretically-probabilistic method of assembly, verification, Petri nets.

Попов Андрей Вячеславович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Момот Мирослав Александрович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: momot75@mail.ru.

Сергеев Евгений Сергеевич – магистрант каф. информационных управляющих систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Popov Andrei Vyacheslavovich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Information Control Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.

Momot Miroslav Aleksandrovich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Information Control Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: momot75@mail.ru.

Sergeev Evgenii Sergeevich – Graduate Student of Dept. of Information Control Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.