

УДК 677.055

DOI 10.47367/0021-3497\_2022\_2\_204

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ АГРЕГАТОВ**

**MODELING TECHNOLOGY OF HIGH-PRECISION UNITS ASSEMBLE**

*Л.Ю. РУДНЕВА, М.С. КОРНЕЕВ, И.Б. БАЕВ*

*L.YU. RUDNEVA, M.S. KORNEYEV, I.B. BAYEV*

**(МИРЭА - Российский технологический университет, Москва)**

**(MIREA - Russian Technological University, Moscow)**

E-mail: rudnewal@list.ru

*Сложные высокоточные изделия больших технологических систем (БТС) имеют существенное рассеяние показателей качества. Они могут быть усовершенствованы на заключительном этапе на основе выбора оптимальных решений за счет моделирования технологических процессов сборки.*

*Complex precision machinery products of Big Technological Systems (BTS) have instability of product quality. The latter must be improved on the final stage of manufacturing products based on the selection of optimal solutions by simulating assembly technological processes.*

**Ключевые слова:** сборка, моделирование, технологический процесс, алгоритмы.

**Keywords:** assembly, modeling, technological process, algorithms.

*Цель*

Определение взаимосвязи параметров на этапе разработки высокоточных агрегатов для текстильной промышленности – этапе научно-исследовательских работ или предпроектных стадиях – позволит сократить сроки проектирования новых операционных технологических систем (ОТС) и провести модернизацию существующих

ОТС на соответствующих предприятиях, а также сократить срок подготовки сборочного производства в среднем на 2...3 года.

*Актуальность*

Вопросам сборки прецизионных изделий уделяли внимание такие ученые, как: А.М. Дальский, В.С. Корсаков, Б.С. Балакшин, А.А. Гусев, И.В. Венцлавский, М.Д. Солодов.

До настоящего времени некоторые вопросы моделирования при проектировании и конструировании ОТС, СТО и средств контроля параметров приборов при сборке агрегатов для текстильных производств не были рассмотрены. В работах [1], [2] рассматривались вопросы выбора и создания логических схем алгоритмов и математических моделей контрольно-испытательной аппаратуры (КИА) и оборудования применительно к изготовлению прецизионных изделий.

В статье [13] рассматривается рабочий процесс от проектирования до изготовления трикотажных мембранных оболочек с непрерывной машинной вязкой в качестве основного растягивающего элемента. В работе [14] можно найти доказательства того, что текстильная промышленность требует выполнения операций высокой точности, особенно в трехмерном текстиле, который должен обладать необходимыми характеристиками после выполненной обработки.

Различные процессы, протекающие совместно с процессом обработки текстильного материала, могут влиять на качество выпускаемой продукции. Например, в статье [15] показана корреляция между адгезией и химическими характеристиками агрегатов с ЧПУ, а в работе [16] демонстрируется влияние мощности генерируемой энергии на качество раскройки текстильных волокон.

Необходимые и трудно получаемые характеристики выпускаемых изделий можно получить только на прецизионном оборудовании, которое в свою очередь должно быть грамотно спроектировано.

Потребность в отыскании оптимальных решений в области технологии и организации текстильного производства, в сборке высокоточных изделий при часто сменяемой номенклатуре приборов, выпускаемых небольшими сериями. Сроки подготовки производства при освоении сокращаются, а точность изготовления определяющих деталей (корпусы, поплавки, рамы, крышки, роторы и др.) возрастает. В связи с сокращением сроков изготовления агрегатов возникает необходимость в более

короткие сроки сравнивать, анализировать, проектировать и конструировать технологическое оборудование текстильной промышленности и средства контроля. Сокращение сроков подготовки производства при обеспечении требуемого уровня, качества выпускаемой продукции можно обеспечить различными методами, в том числе за счет моделирования технологии.

#### *Введение*

Сборочные производства высокоточных текстильных агрегатов на современных приборостроительных предприятиях представляют собой сложные организационно-технические системы и могут быть представлены в виде больших технических систем (БТС). В свою очередь такие БТС включают в себя различные операционные технологические системы (ОТС), решающие специальные задачи, например, системы раскроя материала, гравирования, формования, выполнения отделочных операций, контрольных и др. [3]. С усложнением задач, выполняемых высокоточными агрегатами, значительно возросли требования к точности СТО и существенно расширился круг вопросов по комплексному проектированию и выбору ОТС из имеющихся конструкций и решений.

Основным выходным показателем процесса сборки агрегатов является геометрическая точность обработки текстильного изделия, которая в итоге оказывает влияние на эксплуатационные свойства машин и механизмов. Особенно это касается сопрягаемых деталей, входящих в прецизионные изделия, которые изготавливаются с субмикронной точностью, таких как: роторы, турбины, с применением метода сверхскоростной обработки резанием и других высокоточных методов обработки.

Среди факторов, вызывающих геометрические погрешности при сборке прецизионных изделий, наибольшее влияние оказывают геометрические неточности деталей, поступающих на сборку, а также упругие и тепловые перемещения, происходящие во внутренних микроструктурах материалов, из которых изготавливаются детали, а также различные неточности

сборочных единиц и элементов технологической сборочной системы, связанные с несовершенством процесса производства [4].

#### *Моделирование технологии*

В вопросах моделирования при конструировании ОТС для текстильной промышленности центральное место в логическом проектировании занимает проблема развития теории синтеза оптимальных структур оборудования и СТО, имеющая три основных аспекта: алгоритмический, структурный и количественной оценки надежности [5].

Алгоритмический аспект включает задачи выявления и формализации алгоритма функционирования систем. Структурный синтез заключается в кодировании составных систем. Количественная оценка функциональной надежности при заданных параметрах включает анализ функциональных элементов.

Анализ конструктивно-технологических характеристик изделий показал, что современные ОТС в процессе функционирования в зависимости от заданного цикла работы обеспечивают механические, электрические, оптические, электромагнитные и другие параметры сборочных единиц, приборов и прецизионных изделий.

ОТС сборки состоит, как правило, из различных подсистем и устройств. Сопряжение основных подсистем ОТС можно описать соответствующими алгоритмами. Например, при токовом обезгаживании внутренних полостей должны быть сопряжены система обогрева, вакуумная система и система контроля времени.

Технологические процессы сборки, базирующиеся на типовых СТО, включают два устройства – управляющее, то есть собственно СТО, и управляемое – объекты (сборочные единицы, агрегаты), которые подвергаются воздействиям со стороны СТО.

От управляющего устройства поступают команды, которые реализуются управляемым устройством. В свою очередь от управляемого устройства поступает осведомительная информация, которая позволяет судить о состоянии управляемого устройства и режиме работы управляющего устройства.

Управляющее устройство, например, при применении АСУТП, перерабатывает всю поступающую к нему информацию, на основании этой переработки принимает решение о том, какое требуется вмешательство в режим работы управляющего устройства (режим работы с обратной связью) [6].

Для описания алгоритмов, перерабатывающих информацию, применен математический аппарат ЛСА (логическая система алгоритмов) – конечная строка, составленная из символов рабочих операций (элементарных действий)  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), логических операций (условий)  $P_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) и некоторых символов – стрелок с индексами

$$\uparrow^1, \uparrow^2, \dots, \uparrow^k, \downarrow^1, \downarrow^2, \dots, \downarrow^k,$$

таких, что для каждой стрелки  $\uparrow^i$  найдется только одна стрелка

$$\downarrow^j, A_1, P_1, \uparrow^1, A_j, P_j, \uparrow, \dots, \downarrow, A_{K-1}, \dots, \downarrow^i, A_n,$$

что означает последовательность выполнения одного оператора к выполнению другого оператора.  $A_i$  может зависеть от нескольких логических условий  $P_1, P_2, \dots, P_m$  и записывается в виде булевой функции:

$$a = a(P_1, P_2, \dots, P_m)$$

Порядок выполнения элементарного действия алгоритма  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) является однозначной функцией от значений логических условий  $P_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ). В свою очередь логические условия изменяют значения  $P_j = \{0, 1\}$  в зависимости от результатов выполнения операторов [7].

Значения логических условий в зависимости от значений результатов выполнения операторов действия  $A_i$  задавались с помощью матриц. Элементами матриц являлось множество логических условий  $P_j$ , значения которых изменялись во время цикла выполнения оператора  $A_i$ . Кроме ЛСА, для записи алгоритмов функционирования БТС и ее составных частей ОТС

использовались граф-схемы алгоритмов (ГСА).

В общем виде граф-схему БТС сборки ЧЭ можно представить как конечные множества функциональных связей между операторами в процессе функционирования.

$$A_0 P_1 \uparrow^1 A_1 \downarrow^1 P_2 \uparrow^2 A_2 \downarrow^2 P_3 \uparrow^3 A_3 \downarrow^3 P_3 \uparrow^4 A_4 \uparrow^4 P_4 \uparrow^4 A_5 \downarrow^5 P_5 \uparrow^5 A_6 \downarrow^6 P_6 \uparrow^6 A_7 \downarrow^7 P_7 \uparrow^7 A_8 \downarrow^8 P_8 \uparrow^8$$

Граф-схема алгоритма БТС сборки ЧЭ представлена на рис. 1.

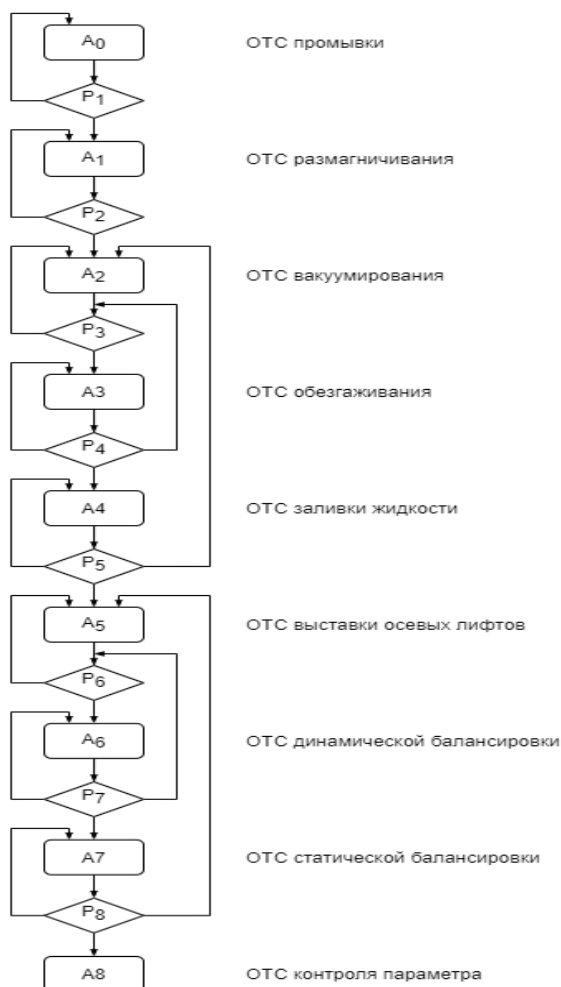


Рис. 1

С усложнением задач и технических требований к проектированию автоматизированных и механизированных систем сборки в ГСА следует ожидать только усложнения символики алгоритмов. Операторные и логические части ГСА по-прежнему будут отображать последовательность выполнения действий и команд. Таким образом, ГСА можно применять для

СТО любых классов и групп приборов и агрегатов.

Любую неизолированную операционную систему сборки можно охарактеризовать входом, внутренней структурой, определяющей протекание физико-химических процессов, и выходом, связывающим систему с внешней средой.

Вход ОТС характеризует потоки веществ, энергии и информации, поступающие в систему из внешней среды и со стороны смежных систем через каналы связи.

В управляемых системах ОТС через входные каналы поступают управляющие воздействия.

Внутренние параметры системы подразделяются на собственно параметры а операционной системы и параметры процессов р, протекающих в системе. Под собственными параметрами понимаются технические характеристики, величины, определяющие свойства материалов, а также изменения свойств исходных материалов во времени в связи с неоднородностью состава. Параметры процессов, протекающих в системе, характеризуют стационарное состояние системы (тепловое, вакуумное, напряженно-деформированное и т.д.) и стационарные процессы переноса массы, энергии и информации.

Выход системы характеризуется параметрами процессов, в которых заинтересованы потребители (точность, герметичность, дисбаланс, потребляемая мощность, сопротивление изоляции проводников и т.д.).

Если ОТС относится к разряду БТС, то в число параметров а и (з следует включить только обобщенные физические параметры, что сокращает число решаемых задач. Математическое описание операционных систем сборки позволяет наглядно представить взаимосвязь между параметрами и получить данные для прогнозирования параметров ОТС для новых приборов и агрегатов.

Были составлены модели ГСА операционных систем применительно к сборке ЧЭ по входу-выходу, то есть внешние описания операционных систем, которые

позволили рассматривать системы как устройства, преобразующие выходы физических параметров БТС.

В общем виде внешние описания системы БТС можно представить так:

$$f \div X \rightarrow \Gamma,$$

где  $X$  и  $\Gamma$  – множества возможных входов и выходов соответственно.



Рис. 2

Граф-схема ОТС сборки ЧЭ представлена на рис. 2, а схема входа-выхода ОТС сборки – на рис. 3.

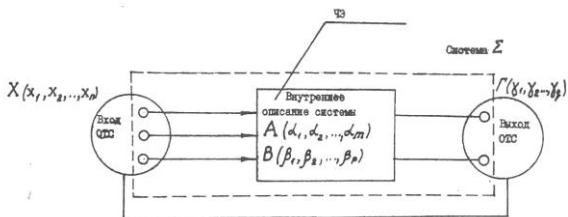


Рис. 3

Для систем сборки приборов и агрегатов конечное число состояний будет:

$$\Sigma = f \div (X, \Gamma, A, B),$$

где  $A$  – множество собственных параметров ОТС;  $B$  – множество параметров процессов ОТС.

Созданные структурные схемы алгоритмов и математические модели ОТС позволяют описать исследуемый ЧЭ с любой степенью детализации, не нарушая общей структуры моделей.

В поставленной задаче можно провести декомпозицию ЧЭ до отдельных сборочных единиц и деталей, а технологических процессов – до отдельных операций, выполняемых на каждом виде оборудования с учетом проведения организационных мероприятий и других условий. При этом увеличивается лишь число элементов моделей, а структура остается неизменной [8].

Разработка ОТС сборки в общей БТС – сложная технико-экономическая задача, предполагающая реализацию большого числа взаимосвязанных частных задач оптимизации различных по физической природе процессов. Для этого может быть использован оптимальный набор средств и режимов их работы, либо выбраны оптимальные значения параметров ОТС в заданный интервал времени. Во втором случае можно воспользоваться принципом расчленения общих задач на частные:

вначале решается задача оптимального выбора ОТС, затем проверяется реализуемость процессов в заданный интервал времени. При положительных результатах набор ОТС принимается за оптимальный. В противном случае оптимальный набор ОТС и последовательность выполнения операций определяется путем выбора наилучших оптимальных вариантов в первоначальном наборе [5]. При таком подходе возникает возможность оптимизации выбора ОТС на основе просмотра небольшого количества возможных комбинаций, используя перспективные технологии, в числе которых можно назвать цифровые двойники [9].

## ВЫВОДЫ

Разработан единый алгоритм функционирования БТС сборки чувствительных элементов прецизионных изделий, включающий операционные технологические системы.

Описание алгоритмов функционирования БТС и ОТС выполнено на языке логических схем алгоритмов.

Применение математического аппарата – логических схем алгоритмов – позволяет организовать процесс управления технологическим процессом сборки, то есть процесс переработки информации, так, как это происходит в самом технологическом процессе.

Создание граф-схем и логических схем алгоритмов ОТС дает возможность установить взаимосвязь между параметрами блоков и модулей ОТС и выходными параметрами приборов и прецизионных изделий и обеспечить сопряжение параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Свойства задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал – втулка" // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017, № 1.
2. Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю. Обеспечение эффективного выполнения сборочных операций высокоточных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017, № 5.
3. Absattarov A.I., Pisarenko Yu.A., Zelentsova N.I. Applying refinery outgoing gas as a source of

petrochemical products. *Fine Chemical Technologies*. – 2015;10(4):32...40.

4. Васильев А.С. Справочник технолога-машиностроителя. – В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2018.

5. Руднева Л.Ю., Литвинчук А.В. Система управления и структуры математического обеспечения автоматизированных транспортно-складских систем машиностроительных производств // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018, № 10.

6. Холопов В.А., Каширская Е.Н., Гусев М.В. Оптимизация конфигурации промышленных Ethernet-сетей на этапе проектирования АСУП // Российский технологический журнал, Т.6. – 2018, № 2. doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2

7. Кузнецов О.П. Дискретная математика для инженера. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2020.

8. Зуев А.С., Зуева А.Н., Леонов Д.А. Технологии дополненной реальности как новый источник конкурентных преимуществ продукции машиностроения // Российский технологический журнал. – 2020, №8(1).

9. Kholopov V.A., Antonov S.V., Kurnasov E.V., Kashirskaya E.N. Digital twins in manufacturing Russian Engineering Research. – 2019. V. 39. № 12. P.1014...1020. doi: 10.3103/S1068798X19120104

10. Кузнецов П.М., Борзенков В.В., Дьяконова Н.П. и др. Автоматизация технологических процессов и подготовки производства в машиностроении / Под ред. П.М. Кузнецова/ – Старый Оскол: ООО ТНХ, 2018.

11. Kholopov V.A., Antonov S.V., Kashirskaya E.N. Application of the digital twin concept to solve the monitoring task of machine-building technological process // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russia. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867800.

12. Kashirskaya E.N., Kholopov V.A., Antonov S.V., Pimenov A.V. Transient Oscillatory Processes At The Balancing Device Operation Of Abrasive Wheel Grinder // Journal Of Physics: Conference Series. – 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022070.

13. Gupta S.S., Tan Y.Y., Chia P.Z. et al. Prototyping knit tensegrity shells: a design-to-fabrication workflow. *SN Appl. Sci.* 2, 1062 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2693-4>.

14. Giglio A., Paoletti I. & Conti G.M. Three-Dimensional (3D) Textiles in Architecture and Fashion Design: a Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice. *Appl Compos Mater* (2021). <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09932-9>

15. Lahiji R.R., Boluk Y. & McDermott M. Adhesive surface interactions of cellulose nanocrystals from different sources. *J Mater Sci* 47, 3961–3970 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6247-z>.

16. Matsouka D., Vassiliadis S., Prekas et al. On the Measurement of the Electrical Power Produced by Melt Spun Piezoelectric Textile Fibres. *Journal of Elec*

## REFERENCES

1. Sorokin M.N., Anurov Yu.N. Properties of the picking problem in the selective assembly of products of the "shaft - bushing" type // *Assembly in mechanical engineering, instrument making*. - 2017, No. 1.
2. Nazar'ev A.V., Bochkarev P.Yu. Ensuring the effective performance of assembly operations of high-precision products // *Assembly in mechanical engineering, instrument making*. - 2017, No. 5.
3. Absattarov A.I., Pisarenko Yu.A., Zelentsova N.I. Applying refinery outgoing gas as a source of petrochemical products. *Fine Chemical Technologies*. – 2015;10(4):32...40.
4. Vasiliev A.S. Handbook of technologist-machine builder. - In 2 vols. Vol. 2 / Ed. A.S. Vasilyeva, A.A. Kutin. - 6th ed., revised. and additional – M.: Mashinostroenie, 2018.
5. Rudneva L.Yu., Litvinchuk A.V. Control system and structures of mathematical support for automated transport and storage systems of machine-building industries // *Assembly in mechanical engineering, instrument making*. - 2018, No. 10.
6. Kholopov V.A., Kashirskaya E.N., Gusev M.V. Optimization of the configuration of industrial Ethernet networks at the design stage of the automated control system // *Russian Technological Journal*, V.6. – 2018, No. 2. [doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2](https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2)
7. Kuznetsov O.P. *Discrete Mathematics for an Engineer*. - 6th ed., revised. and additional – M.: Energoatomizdat, 2020.
8. Zuev A.S., Zueva A.N., Leonov D.A. Augmented Reality Technologies as a New Source of Competitive Advantages of Mechanical Engineering Products // *Russian Technological Journal*. - 2020, No. 8(1).
9. Kholopov V.A., Antonov S.V., Kurnasov E.V., Kashirskaya E.N. Digital twins in manufacturing

- Russian Engineering Research. – 2019. V. 39. No. 12. P.1014...1020. [doi: 10.3103/S1068798X19120104](https://doi.org/10.3103/S1068798X19120104)
10. Kuznetsov P.M., Borzenkov V.V., Dyakonova N.P. et al. Automation of technological processes and preparation of production in mechanical engineering / Ed. P.M. Kuznetsova / - Sary Oskol: TNK LLC, 2018.
  11. Kholopov V.A., Antonov S.V., Kashirskaya E.N. Application of the digital twin concept to solve the monitoring task of machine-building technological process // *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. – Sochi, Russia. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867800.
  12. Kashirskaya E.N., Kholopov V.A., Antonov S.V., Pimenov A.V. Transient Oscillatory Processes At The Balancing Device Operation Of Abrasive Wheel Grinder // *Journal Of Physics: Conference Series*. – 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/2/022070.
  13. Gupta S.S., Tan Y.Y., Chia P.Z. et al. Prototyping knit tensegrity shells: a design-to-fabrication workflow. *S.N.Appl. sci.* 2, 1062 (2020). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2693-4>.
  14. Giglio A., Paoletti I. & Conti G.M. Three-Dimensional (3D) Textiles in Architecture and Fashion Design: a Brief Overview of the Opportunities and Limits in Current Practice. *Appl Compos Mater* (2021). <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09932-9>
  15. Lahiji R.R., Boluk Y. & McDermott M. Adhesive surface interactions of cellulose nanocrystals from different sources. *J Mater Sci* 47, 3961–3970 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6247-z>.
  16. Matsouka D., Vassiliadis S., Prekas et al. On the Measurement of the Electrical Power Produced by Melt Spun Piezoelectric Textile Fibres. *Journal of Elec Materi* 45, 5112–5126 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4710-3>.

Рекомендована кафедрой промышленной информатики Института кибернетики. Поступила 12.11.21.