

УДК 381.3.06

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.012

## Применение многоуровневой декомпозиции для создания цифрового двойника сборочного производства электронной аппаратуры

Курносенко Алексей Евгеньевич, Власов Андрей Игоревич

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Россия, Москва, *akurn@bmstu.ru*

**Аннотация.** В работе представлен подход к созданию цифрового двойника производства электронной аппаратуры на печатных платах. Применена двухуровневая декомпозиция производственного процесса на операции, технологические переходы и далее на функциональные узлы применяемого технологического оборудования и оснащения для автоматизированных и ручных операций сборки. Рассмотрено моделирование ручных операций сборки, представлена комплексная цифровая модель рабочего места установки компонентов с использованием антропоморфного манекена оператора-монтажника. Использовано программное обеспечение Tecnomatix компании Siemens DI. На примере разработанной цифровой модели производства с участием типового изделия рассмотрен ряд сценариев организации рабочего места и производственного участка в целом, выполнено дискретное имитационное моделирование, проанализированы основные результаты применительно к производительности спроектированного участка. Выполнена модернизация цифровой модели в целях увеличения загрузки технологического оборудования и повышения суммарной производительности участка сборки.

**Ключевые слова:** технологическая подготовка производства, цифровое производство, цифровой двойник, автоматизация производства, производство электронных модулей, дискретное имитационное моделирование

**Цитирование:** Курносенко А.Е. Применение многоуровневой декомпозиции для создания цифрового двойника сборочного производства электронной аппаратуры / А.Е. Курносенко, А.И. Власов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 3(27). – С. 126-134. – DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.012.

**Введение.** Цифровизация производства электронной аппаратуры, выполняемая в рамках концепции «Индустрия 4.0» и киберфизических систем, предполагает комплексный подход к цифровой трансформации, учитывающий широкий спектр решаемых задач [1-6] и необходимость эффективной работы с большими данными [7-9]. Прежде всего, это подразумевает целостность и неразрывную связь цифровых моделей выпускаемых изделий, технологических процессов, оборудования, оснащения, материально-логистических потоков и рабочего персонала. Эти модели должны описываться в едином информационном пространстве с возможностью перекрестного обмена данными на входах и выходах, образуя в совокупности структуру, известную как «цифровой двойник» [10, 11]. В настоящее время среди основных проблем внедрения подобных цифровых двойников можно выделить разобщенность данных об изделии, методах, процессах и оборудовании для его изготовления, сложность формализации задачи моделирования и разбиения ее на иерархические подзадачи, трудность цифровой формализации разнородных технологических операций в рамках единого техпроцесса, применение различных САПР для решения отдельных подзадач, сложность учета человеческого фактора в модели автоматизированного производства [11].

Задача иерархического разбиения или, другими словами, декомпозиции общей задачи создания цифрового двойника представляется особенно важной, так как от ее решения зависит получаемая структура модели данных и ее гибкость. Ошибки при построении иерархии задач могут привести к избыточности и нарушению ассоциативности данных, получению громоздкой модели, сложной с точки зрения использования и интерпретации информации. В данной работе мы рассмотрим указанную задачу на характерном для электронной отрасли примере моделирования и подготовки производства электронных модулей I уровня на печатных платах. Следует отметить, что рассматриваемый подход можно применять и для бо-

лее сложных производственных процессов – для отрасли производства электроники примером может выступить, например, производство электронных модулей по технологии трехмерных литых монтажных оснований (3DMID) [6, 12]. Структурно работа предусматривает декомпозицию задачи на уровни, создание моделей технологического оборудования и рабочих мест в составе производственного участка, проведение исследований методом дискретного имитационного моделирования, с анализом результатов и рассмотрением различных вариантов построения производственного участка.

**1. Анализ литературных источников.** При решении задачи моделирования цифровых производств электронной аппаратуры преимущество отдается методам дискретного имитационного моделирования по сравнению с аналитическими методами [10, 11]. Первая группа методов лучше отвечает дискретному характеру сборочного производства, основанному на последовательности событий, а также позволяет лучше отразить статистический характер внешних воздействий и внутренних отказов производственной системы [12].

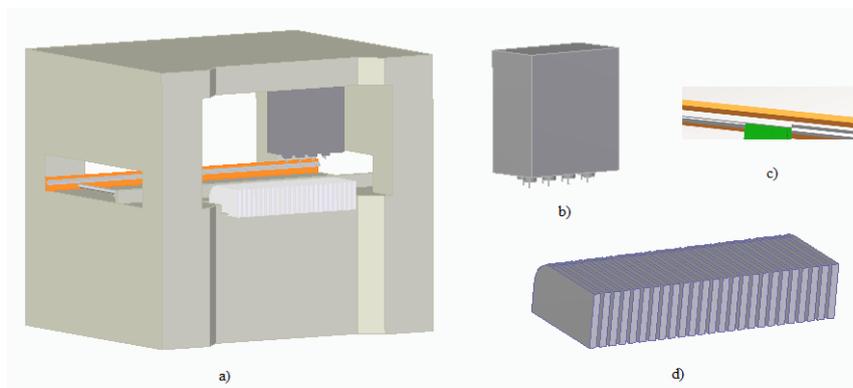
Чтобы эффективно поддерживать единое информационное пространство цифровых моделей, с точки зрения методов программной реализации указанных методов преимущество имеет конструкторская САПР и система подготовки и моделирования производства, преимущественно от одного поставщика программных решений. Обзор рынка таких систем представлен, например, в [13]. Конструкторская САПР в этом случае выполняет функции создания моделей изделия и отдельных узлов технологического оборудования и оснащения, а система подготовки производства отвечает непосредственно за создание цифрового двойника и имитационное моделирование производственных процессов. Преимуществом такого состава сред проектирования является не требующий дополнительных преобразований информации переход от конструкторской к имитационной модели. Среди примеров таких связей – продукты SolidWorks/CATIA и DELMIA от компании Dassault Systemes, а также Solid Edge/NX и Tecnomatix от компании Siemens DI. Немаловажно, что оба решения в области подготовки и моделирования производства способны функционировать под управлением систем поддержки жизненного цикла изделий (соответственно ENOVIA и Teamcenter), которые облегчают поддержку целостности и связности различных моделей в составе цифрового двойника.

Подобные системы автоматизированной подготовки производства решают широкий набор задач, начиная от разработки маршрутного и операционного техпроцессов, компоновки производственного участка и задания материально-логистических потоков до непосредственного имитационного моделирования работы участка/цеха с визуализацией результатов в различной форме и подготовки управляющих программ для автоматизированного технологического оборудования [14-16]. В данной работе использована связка САПР Solid Edge и системы подготовки производства Tecnomatix.

**2. Описание методов и средств создания цифровых двойников.** Для решения задачи создания цифрового двойника была реализована декомпозиция производственных объектов на двух уровнях иерархии. Первый, верхний уровень декомпозиции представляет собой разбиение технологического процесса сборки на отдельные операции с последующей классификацией этих операций, как выполняемых полностью на автоматизированном оборудовании, так и вручную с возможным применением средств автоматизации. Этот процесс рассмотрен в [11, 13]. Далее для каждой классифицированной операции осуществляется декомпозиция на втором, нижнем уровне, на отдельные технологические переходы. Она сопровождается декомпозицией технологического оборудования и оснащения на отдельные функциональные узлы, выполняющие переход или группу переходов.

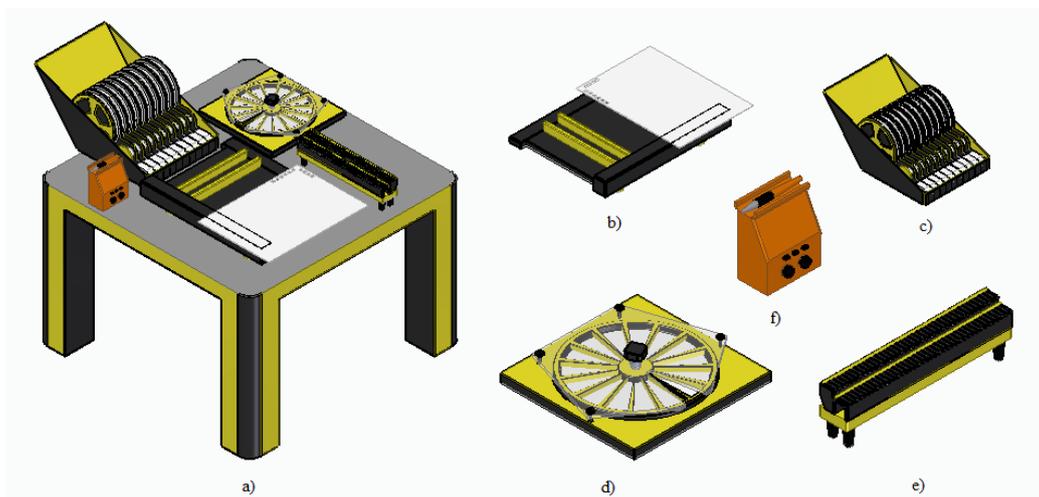
Подробнее остановимся на примерах проведенной на втором уровне декомпозиции (рисунки 1 и 2). На рисунке 1 представлена декомпозиция портального автомата установки

компонентов (а) с выделением в качестве отдельных функциональных узлов блока сборочных головок (b), конвейерной системы транспортировки печатных плат (с) и блока ленточных питателей компонентов из катушек (d). Степень детализации отдельных узлов зависит от требований к реалистичности воспроизведения реальной кинематики движущихся механизмов автомата при моделировании процессов захвата компонента из питателя, проноса его над камерами системы технического зрения и установки в требуемую позицию на печатной плате.



**Рис. 1.** Декомпозиция автомата установки компонентов:  
 а – общий вид автомата; b – блок сборочных головок;  
 с – конвейерная система; d – блок ленточных питателей

На рисунке 2 представлена декомпозиция рабочего места, оснащенного системой ручной установки компонентов (а). Система была декомпозирована на отдельные функциональные узлы, в числе которых рабочий стол для фиксации печатной платы (b), блок ленточных питателей компонентов из катушек (с), карусельный питатель компонентов из россыпи (d), блок питателей компонентов из обрезков лент (е), а также дозатор паяльной пасты с вакуумным пинцетом для установки компонентов (f).

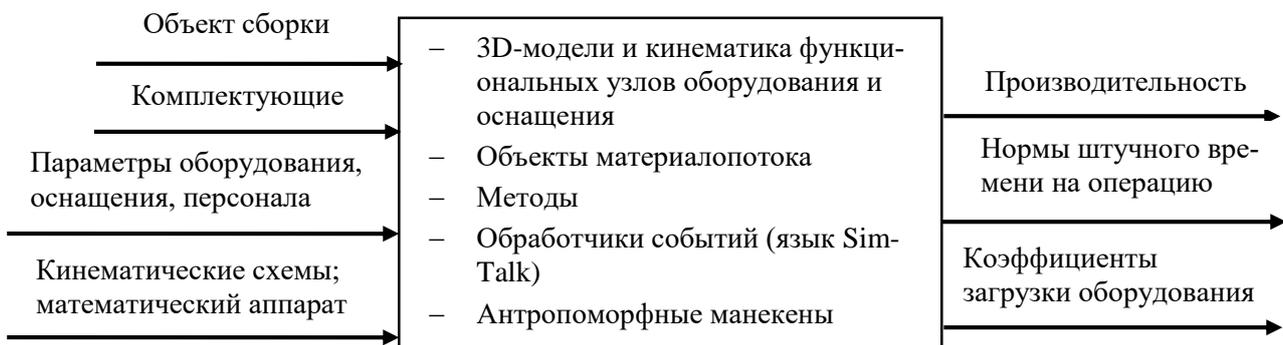


**Рис. 2.** Декомпозиция рабочего места, оснащенного системой ручной установки компонентов:  
 а – общий вид рабочего места; b – рабочий стол; с – блок ленточных питателей;  
 d – карусельный питатель из россыпи; е – блок питателей из обрезков лент;  
 f – дозатор паяльной пасты с вакуумным пинцетом

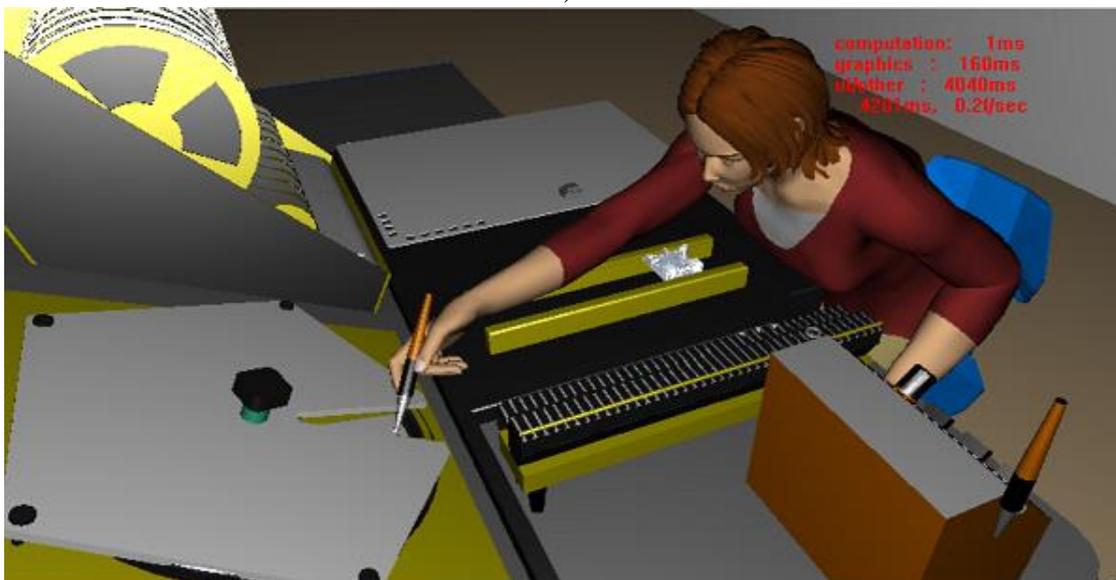
Такое построение облегчает последующее формирование цифровых моделей технологических переходов вида «взять вакуумный пинцет», «захватить компонент из питателя вакуумным пинцетом», «установить компонент на поверхность печатной платы» и пр. Декомпозированное таким образом рабочее место интегрируется в цифровую модель операции

ручной установки компонентов, которая, в свою очередь, создается с участием цифровых моделей персонала – монтажников в виде антропоморфных цифровых манекенов. Данный механизм реализуется при помощи модуля Jack/Simulate Human из состава системы Tecnomatix, который можно применять, в частности, и для моделирования роботизированных операций [18, 19].

Созданная для указанной операции модель приведена на рисунке 3. Построение таких комплексных моделей, включающих в себя и компоненты технологического оснащения, и рабочий персонал, позволяют оценить, в частности, принципиальную реализуемость операции с точки зрения физической достижимости отдельных узлов и механизмов оператором, выполнить оценку производительности с учетом человеческого фактора – ошибок, накопленной усталости и т.д., а также модифицировать компоновку рабочего места с целью достижения комфортных условий работы оператора и повышения производительности операции.



а)



б)

**Рис. 3.** Комплексная цифровая модель рабочего места установки компонентов с антропоморфным манекеном оператора-монтажника:

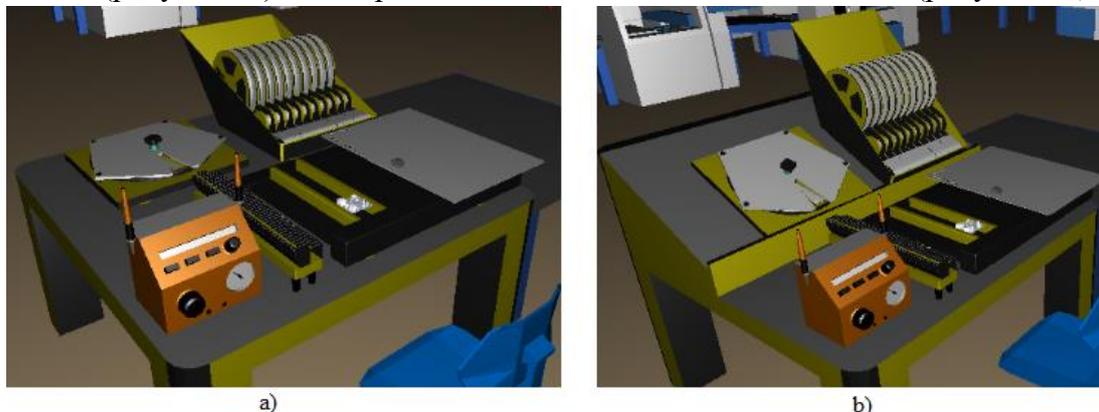
а – входные/выходные данные и состав модели; б – внешний вид модели в САПР

Для созданной таким образом цифровой модели сборочного производства выполнялся ряд экспериментов вида «что, если» с различным составом, компоновкой и количеством автоматизированных и ручных рабочих мест.

**3. Обсуждение результатов.** Преимуществом подхода с декомпозицией задачи является, в частности, возможность получения результатов на различных иерархических уровнях. Результаты для отдельных автоматизированных операций подробно представлены в [13]. В

данной работе мы остановимся на некоторых результатах, полученных на цифровых моделях ручных операций, а также на технологической линии в целом.

В таблице 1 представлено накопленное время, которое монтажник тратит на то, чтобы последовательно достичь четырех узлов системы установки компонентов при различной компоновке своего рабочего места. В первом варианте в распоряжении оператора имеется плоский стол (рисунок 4а), во втором – стол с подставкой-возвышением (рисунок 4б).



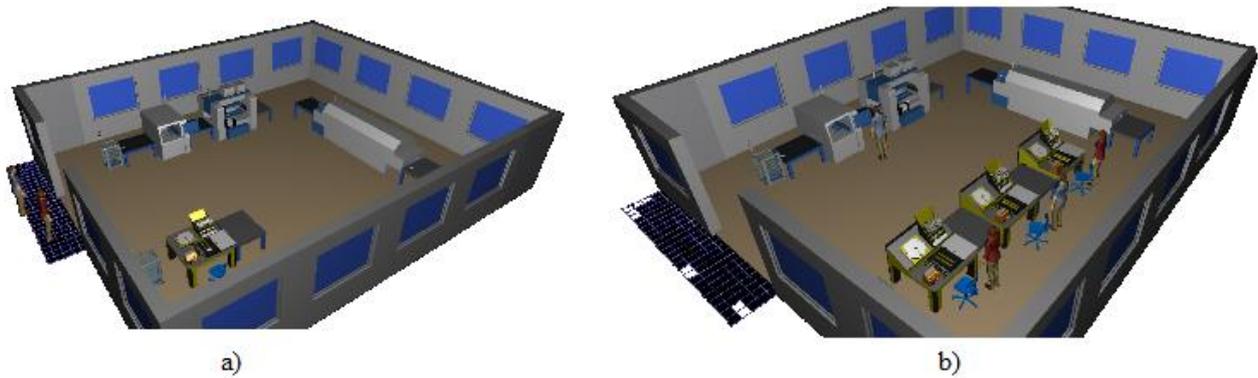
**Рис. 4.** Варианты компоновки рабочего места монтажника:  
а – плоский стол; б – стол с подставкой-возвышением

**Таблица 1.** Накопленное время достижения узлов в зависимости от варианта компоновки рабочего места, сек.

Название позиции	Вариант рабочего места	
	Плоский стол	Стол с подставкой
Go	1,5	1,0
Pose	2,5	2,0
Sit	2,5	2,0
Get_P	3,5	3,0
Position_P	4,0	3,3
Position_P0	4,3	3,6
Position_P1	4,7	4,4
Stand	4,7	–
Position_P2	6,9	5,0
Position_P3	9,3	5,5
Position_P4	11,4	6,3
Position_P5	13,6	–
Sit0	13,6	–
Put_P	14,5	7,0
Stand0	14,5	7,1
Go0	15,3	7,7

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о преимуществе второго варианта с подставкой, позволяющего монтажнику избежать вставания со стула (позиция Stand) и одновременно более чем в 2 раза сокращающего затраты времени на операцию.

Далее была промоделирована вся технологическая линия сборки в составе автомата трафаретной печати, автомата установки компонентов, печи пайки оплавлением и рабочих мест ручной установки компонентов в двух вариантах (рисунок 5): с одним рабочим местом с плоским столом (рисунок 5а) и с тремя рабочими местами со столами, оснащенными подставкой (рисунок 5б). Результаты по производительности линий представлены в таблице 2.



**Рис. 5.** Варианты компоновки технологической линии сборки:

- a – с одним рабочим местом ручной установки компонентов с плоским столом;  
 b – с тремя рабочими местами ручной установки компонентов, оснащенные столами с подставкой-возвышением

**Таблица 2.** Производительность технологических линий сборки

	Вариант компоновки линии	
	1 рабочее место	3 рабочих места
Среднее штучное время на один модуль, мин	86,5	36,3
Производительность линии, модулей/ч	9	21
Загрузка оборудования трафаретной печати, %	3,5	5,1
Загрузка оборудования установки компонентов, %	35,4	77,4
Загрузка оборудования пайки оплавлением, %	53,8	93,2
Загрузка оператора автоматизированного оборудования, %	100,0	89,0
Загрузка монтажников, %	15,0	87,1

Из результатов очевидно, что вариант с тремя рабочими местами позволяет увеличить производительность линии более чем в два раза. В первом варианте компоновки линии рабочее место ручной установки компонентов является самым узким местом, вследствие чего возникает простой автоматизированного оборудования. Увеличение количества рабочих мест монтажников до трех позволяет сбалансировать работу линии и добиться повышения производительности оборудования и линии в целом.

**Заключение.** Одним из существенных достоинств цифрового двойника сборочного производства является возможность проигрывать различные сценарии вида «что, если» на каждом из иерархических уровней без затратных натуральных экспериментов, связанных с внесением изменений в конфигурацию реальной линии, а также без необходимости проведения тестового запуска самой линии и выполнения техпроцесса сборки физических изделий. Немаловажна также возможность получения не только качественной (пригодно/непригодно), но и количественной оценки описываемых производств – в частности, коэффициента загрузки технологического оборудования, производительности операции установки компонентов с учетом оптимального пути обхода позиций установки [6, 20]. Указанные достоинства эффективно проявляют себя как при создании новых, так и при модернизации существующих производств.

Описанная выше комплексная цифровая модель рабочего места монтажника, декомпозированная на нижнем иерархическом уровне до отдельных узлов, позволяет проработать многочисленные сценарии компоновки, организации и оснащения, что дает возможность спроектировать рабочее место с учетом эргономики и анатомических особенностей челове-

ка-оператора и в результате обеспечить повышенную эффективность выполнения технологической операции.

Среди дополнительных областей применения подобных цифровых двойников можно выделить моделирование запуска в производство новых изделий, оптимизацию переналадок технологического оборудования и количества обслуживающего персонала, организацию и оптимизацию логистических потоков комплектующих, материалов, оснащения и готовых изделий с участием автоматизированного склада.

Приведенный подход, основанный на многоуровневой декомпозиции, позволяет сделать цифровую модель компактной, целостной и облегчить ее модификацию путем добавления/исключения/изменения отдельных элементов модели, например, функциональных узлов сборочного оборудования, на необходимых уровнях иерархического разбиения. Подход не привязан к конкретной отрасли и может быть распространен на прочие производственные и иные процессы, допускающие многоуровневую декомпозицию своих составных частей.

**Благодарности.** Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту №0705-2020-0041 «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем».

#### Список источников

1. Akberdina V., Kalinina A., Vlasov A. Transformation stages of the Russian industrial complex in the context of economy digitization. *Problems and Perspectives in Management*, 2018, no.16(4), pp. 201-211.
2. Wang S., Wan J., Li, D. Zhang C., Implementing smart factory of Industry 4.0. Outlook. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, no. 3159805.
3. Vlasov A.I., Shakhnov, V.A. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components. *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*, 2020.
4. Breivold H.P., Sandström K. Internet of Things for Industrial Automation – Challenges and Technical Solutions. *IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*, 2015, pp. 532-539.
5. Zhao Q. Presents the Technology, Protocols, and New Innovations in Industrial Internet of Things (IIoT). *Internet of Things for Industry 4.0. EAI. Springer Innovations in Communication and Computing*, Springer, Cham, 2020.
6. Kurnosenko A.E., Arabov D.I. Optimization of electronic components mounting sequence for 3d mid assembly process. *Proc. Breakthrough directions of Scientific Research in NRNU MEPhI: Development Perspectives in the Framework of the Strategic. KnE Engineering*, 2018, no. 3(6), pp. 311-321.
7. Prudius A.A., Karpunin A.A., Vlasov A.I.: Analysis of machine learning methods to improve efficiency of BIG DATA processing in Industry 4.0. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1333(3), no. 032065.
8. Vlasov A.I., Muraviev K.A., Prudius A.A., Uzenkov D.A. Load balancing in BIG DATA processing systems. *International Review of Automatic Control*, 2019, 12(1), pp. 42-47.
9. Rygovskiy I.A. Analysis of the effectiveness of methods for processing large data arrays using computing systems. *Informatics Problems*, 2014, no.2, pp. 54-58.
10. Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E., Demin A.A., Vlasov A.I. Industry 4.0 visual tools for digital twin system design. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, 1295, pp. 864-875.
11. Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E. Modelling of the digital electronics manufacturing in the context of Industry 4.0 concept. *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference Digital Transformation of the Industry: Trends, Management, Strategies*, 2020, pp. 585-594.
12. Franke J. 3D-MID: Three-Dimensional Molded Interconnect Devices. *Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers*. Hanser Publications, 2014.
13. Kurnosenko A.E., Levin I. V., Semenyakina V. O., Zakharov E. R. Sherstyuk A. E. Simulation Modeling Methods and Tools in the Study of Electronics Preproduction. *International Forum "IT-Technologies for Engineering Education: New Trends and Implementing Experience" (ITEE-2019). ITM Web Conf*, 2020, vol. 35, N04015.
14. Robinson I., Webber J., Eifrem E. *Graph Databases*, O'Reilly Media, 2013.
15. Martijn R.K. *MesSimulation Modelling using Practical Examples. A Plant Simulation Tutorial. Software version 13.0* (Netherlands: University of Twente), 2017, pp.20-86.
16. Bangsow S. *Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples*. Springer International Publishing Switzerland, 2016.

17. Yudin A.V., Vlasov A.I., Salmina M., Sukhotskiy V. Challenging intensive project-based education: short-term class on mobile robotics with mechatronic elements. *Adv. Intel. Sys. Comp*, 2019, vol. 829, pp. 79-84.
18. Yudin A., Kolesnikov M., Vlasov A., Salmina M. Project oriented approach in educational robotics: From robotic competition to practical appliance. *Adv. Intel. Sys. Comp*, 2017, vol. 457, pp. 83-94.
19. Haller E., Schiller E.F., Hartel I. Impact of the Digital Factory on the Production Planning Process. Integrating Human Aspects in Production Management. *IFIP Intl Conf. Inform. Process*, 2005, vol. 160, pp. 73-84.
20. Ali Fuat Alkaya, Ekrem Duman Application of Sequence-Dependent Traveling Salesman Problem in Printed Circuit Board Assembly. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology*, 2013, no. 3(6), pp. 1063-1076.

*Курносенко Алексей Евгеньевич. Доцент кафедры ИУ-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основные направления исследований включают в себя ECAD/MCAD-системы в приборостроении, оборудование и технологию производства электронной аппаратуры, технологию 3D-MID. AuthorID: 164230, SPIN-код: 6205-3866, ORCID: 0000-0003-0521-3163, akurn@bmstu.ru, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, кафедра ИУ-4.*

*Власов Андрей Игоревич. К.т.н., доцент кафедры ИУ-4 МГТУ им. Н.Э. Основные направления исследований включают в себя системный анализ, информационные системы, телекоммуникационные технологии, цифровую обработку сигналов и нейросети. AuthorID: 15646, SPIN-код: 4901-3509, ORCID: 0000-0001-5581-4982, vlasovai@bmstu.ru, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, кафедра ИУ-4.*

UDC 381.3.06

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.012

## Using multilevel decomposition to create a digital twin of the electronic equipment assembly production

Alexey E. Kurnosenko, Andrey I. Vlasov

Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow, [akurn@bmstu.ru](mailto:akurn@bmstu.ru)

**Annotation.** The paper presents an approach to creating a digital twin of the PCB electronic equipment production. A two-level decomposition of the production process into operations, steps and further to the functional units of the used technological equipment and tools for automated and manual assembly operations is applied. The modeling of manual assembly operations is considered, a complex digital model of the workplace for component mounting using an anthropomorphic dummy of the assembly operator is presented. Tecnomatix software from Siemens DI was used. On the example of the developed digital production model and the typical product, a number of scenarios for organizing the workplace and the production site as a whole are considered, discrete simulation modeling is performed, and the main results are analyzed in relation to the performance of the designed site. The digital model was modernized in order to increase the loading of process equipment and increase the overall productivity of the assembly site.

**Keywords:** preproduction, digital manufacturing, digital twin, manufacturing automation, electronic module manufacturing, discrete simulation modeling

**Acknowledgements:** Some results were obtained with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for project No. 0705-2020-0041 "Fundamental research of methods for digital transformation of the micro- and nanosystem hardware components".

### References

1. Akberdina V., Kalinina A., Vlasov A. Transformation stages of the Russian industrial complex in the context of economy digitization. *Problems and Perspectives in Management*, 2018, no.16(4), pp. 201-211.
2. Wang S., Wan J., Li, D. Zhang C., Implementing smart factory of Industry 4.0. *Outlook. International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016, no. 3159805.
3. Vlasov A.I., Shakhnov, V.A. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components. *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*, 2020.
4. Breivold H.P., Sandström K. Internet of Things for Industrial Automation – Challenges and Technical Solutions. *IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*, 2015, pp. 532-539.
5. Zhao Q. Presents the Technology, Protocols, and New Innovations in Industrial Internet of Things (IIoT). *Internet of Things for Industry 4.0. EAI. Springer Innovations in Communication and Computing*, Springer, Cham, 2020.
6. Kurnosenko A.E., Arabov D.I. Optimization of electronic components mounting sequence for 3d mid assembly

- process. Proc. Breakthrough directions of Scientific Research in NRNU MEPhI: Development Perspectives in the Framework of the Strategic. KnE Engineering, 2018, no. 3(6), pp. 311-321.
7. Prudius A.A., Karpunin A.A., Vlasov A.I.: Analysis of machine learning methods to improve efficiency of BIG DATA processing in Industry 4.0. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1333(3), no. 032065.
  8. Vlasov A.I., Muraviev K.A., Prudius A.A., Uzenkov D.A. Load balancing in BIG DATA processing systems. International Review of Automatic Control, 2019, 12(1), pp. 42-47.
  9. Rygovskiy I.A. Analysis of the effectiveness of methods for processing large data arrays using computing systems. Informatics Problems, 2014, no.2, pp. 54-58.
  10. Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E., Demin A.A., Vlasov A.I. Industry 4.0 visual tools for digital twin system design. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, 1295, pp. 864-875.
  11. Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E. Modelling of the digital electronics manufacturing in the context of Industry 4.0 concept. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference Digital Transformation of the Industry: Trends, Management, Strategies, 2020, pp. 585-594.
  12. Franke J. 3D-MID: Three-Dimensional Molded Interconnect Devices. Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers. Hanser Publications, 2014.
  13. Kurnosenko A.E., Levin I. V., Semenyakina V. O., Zakharov E. R. Sherstyuk A. E. Simulation Modeling Methods and Tools in the Study of Electronics Preproduction. International Forum "IT-Technologies for Engineering Education: New Trends and Implementing Experience" (ITEE-2019). ITM Web Conf, 2020, vol. 35, N04015.
  14. Robinson I., Webber J., Eifrem E. Graph Databases, O'Reilly Media, 2013.
  15. Martijn R.K. MesSimulation Modelling using Practical Examples. A Plant Simulation Tutorial. Software version 13.0 (Netherlands: University of Twente), 2017, pp. 20-86.
  16. Bangsow S. Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples. Springer International Publishing Switzerland, 2016.
  17. Yudin A.V., Vlasov A.I., Salmina M., Sukhotskiy V. Challenging intensive project-based education: short-term class on mobile robotics with mechatronic elements. Adv. Intel. Sys. Comp, 2019, vol. 829, pp. 79-84.
  18. Yudin A., Kolesnikov M., Vlasov A., Salmina M. Project oriented approach in educational robotics: From robotic competition to practical appliance. Adv. Intel. Sys. Comp, 2017, vol. 457, pp. 83-94.
  19. Haller E., Schiller E.F., Hartel I. Impact of the Digital Factory on the Production Planning Process. Integrating Human Aspects in Production Management. IFIP Intl Conf. Inform. Process, 2005, vol. 160, pp. 73-84.
  20. Ali Fuat Alkaya, Ekrem Duman Application of Sequence-Dependent Traveling Salesman Problem in Printed Circuit Board Assembly. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2013, no. 3(6), pp. 1063-1076.

**Kurnosenko Alexey Evgenievich.** Associate Professor of the Department of IU-4 MSTU. N.E. Bauman. The main areas of research include ECAD / MCAD systems in instrumentation, equipment and technology for the production of electronic equipment, 3D-MID technology. AuthorID: 164230, SPIN: 6205-3866, ORCID: 0000-0003-0521-3163, akurn@bmstu.ru, 105005, Moscow, st. 2nd Baumanskaya, d. 5, building 1, Department of IU-4.

**Vlasov Andrey Igorevich.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of IU-4 MSTU. N.E. The main areas of research include systems analysis, information systems, telecommunications technologies, digital signal processing and neural networks. AuthorID: 15646, SPIN: 4901-3509, ORCID: 0000-0001-5581-4982, vlasovai@bmstu.ru, 105005, Moscow, st. 2nd Baumanskaya, d. 5, building 1, Department of IU-4.

Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 16.09.2022.

The article was submitted 08/05/2022; approved after reviewing 09/06/2022; accepted for publication 09/16/2022.