

УДК 681.5

**Автоматизация планирования производственных процессов
авиастроительного предприятия с использованием
цифрового двойника**

Гусев П.Ю.

*Воронежский государственный технический университет,
Московский проспект, 14, Воронеж, 394026, Россия
e-mail: GusevPvl@gmail.com*

Аннотация

Проблемы планирования производственных процессов авиастроительных предприятий в настоящее время являются особенно актуальными. Для решения подобных проблем предлагается использовать автоматизированную систему планирования на основе цифрового двойника производства. Для использования предлагаемой системы на цеховом уровне разработаны два программных клиента. Первый программный клиент обеспечивает взаимодействие цифрового двойника и планово-диспетчерского отдела. Второй программный клиент обеспечивает передачу информации и обратную связь с цеховым уровнем. Комплексное использование предложенной автоматизированной системы позволяет точно и оперативно решать задачи планирования производственных процессов.

Ключевые слова: цифровой двойник, имитационное моделирование, авиастроение, планирование.

Введение

Планирование производственных процессов любого предприятия машиностроительного профиля всегда являлось и является важной и трудоемкой производственной задачей. Для предприятий авиационной отрасли планирование приобретает решающую роль ввиду сложности и многогранности сборочного процесса летательного аппарата. Качественно составленный план учитывает все особенности производства, что позволяет выпускать готовую продукцию точно в срок. Поэтому качество планирования обеспечивает множество сотрудников, объединенных, как правило, в планово-диспетчерские отделы.

Авиастроительное предприятие состоит из множества производственных подразделений, которые представляют собой цеха и участки, на которых проводятся различные технологические операции. Качественный и точный производственный план может быть составлен только в том случае, если все производственные материальные потоки, проходящие по производственным подразделениям, будут учтены. Учитывая сложность авиационных изделий и большое количество сборочных элементов учесть все пересечения материальных потоков человеку фактически невозможно. Поэтому на сегодняшний день существует множество продуктов, обеспечивающих автоматизированное планирование производственных процессов.

Программные продукты автоматизированного планирования, как правило, базируются на основных концепциях планирования: Capacity Requirements Planning (CRP), APS (Advanced Planning & Scheduling), MES – системы и др. [1-10]. Такие

программные продукты достаточно точно рассчитывают текущую производственную ситуацию и составляют производственный план.

Цель работы

Однако следует отметить, что результат фактического выполнения плана не сразу вносится в систему. Чаще всего применяется посменный или посуточный внос данных в систему. Поэтому и уточнения в план вносятся в соответствии с этими сроками. До внесения уточнений в план, производственное подразделение работает по фактически имеющимся производственным заданиям. Но при таком подходе может не обеспечиваться оптимальная очередь выполнения производственных заданий, что приводит к задержке достижения главной цели функционирования предприятия – выпуску готового изделия.

Поэтому целью данной работы выступает поиск возможных решений по обеспечению оперативного контроля выполнения производственного плана и оперативной оптимизации производственного плана.

Для достижения поставленной цели решено использовать цифровой двойник производства, основанный на имитационном моделировании. Теоретические подходы к применению имитационного моделирования как инструмента планирования осуществлялись ранее [11,12], однако эти подходы не проверялись на наборах данных реального производства. Сам инструмент имитационного моделирования, как средство анализа и оптимизации производства, надежно себя зарекомендовал [13,14,15].

Цифровой двойник производства

В настоящее время проблемы создания цифровых двойников производственных систем и изделий являются особенно актуальными. Обусловлено это, прежде всего, теми возможностями, которые предоставляют цифровые двойники [16-20]. Создание цифрового двойника какого-либо изделия или сборочной единицы представляет собой трудоемкую задачу. Но в результате будет получен полный цифровой двойник реального объекта. Этот двойник обеспечивает решение множества важных задач связанных с прочностными расчетами, кинематическим анализом и др. [21, 22].

Возможность создания цифрового двойника изделия обеспечивается комплексом программных средств, который обязательно включает в себя средства для трехмерного моделирования, средства обеспечения расчета прочностных характеристик, а также средства для кинематического анализа.

Цифровой двойник производственной системы представляет собой компьютерную модель, которая в точности повторяет поведение реальной системы. Цифровой двойник производственной системы может обладать различными характеристиками, в зависимости от поставленных задач. Для решения планировочных задач обязательно требуется создание трехмерной модели производства. Для решения задач оптимизации материальных потоков требуется создание логической модели, отражающей сущность производственных процессов. В результате создания цифрового двойника производственной системы обеспечиваются возможности анализа любых производственных решений перед их реальным применением.

С помощью логической модели можно оптимизировать производственные процессы, а также проводить их планирование. Одним из способов создания логической модели производственной системы предприятия является имитационное моделирование. Имитационное моделирование, как инструмент исследования производственных систем, является универсальным и эффективным средством. Имитационная модель может с максимальной точностью повторять реальную систему. Точность моделирования, как правило, ограничена точностью исходных данных.

Современные программные комплексы имитационного моделирования позволяют разрабатывать модели любых типов производства. Одним из таких программных комплексов является Tecnomatix Plant Simulation. Данный программный комплекс зарекомендовал себя как надежный инструмент исследования и оптимизации производства.

С применением Plant Simulation разработана имитационная модель, а затем цифровой двойник реальной производственной системы – цеха по производству деталей из полимерных композиционных материалов авиастроительного предприятия. Подробно разработка имитационной модели, а также оптимизация модели описаны в работе [23].

Разработанная имитационная модель в точности повторяет все производственные процессы цеха, что позволяет использовать ее в качестве цифрового двойника реальной системы. На рисунке 1 представлен один из участков имитационной модели цеха по производству деталей из полимерных композиционных материалов с графиком загрузки рабочих мест.

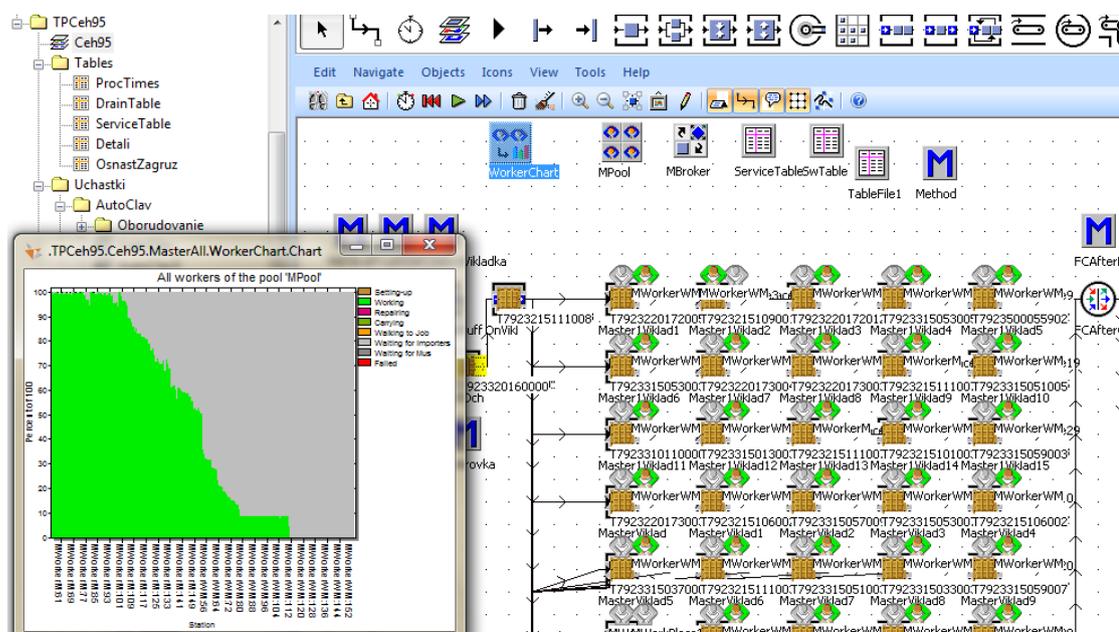


Рис. 1. Имитационная модель участка

Преимуществом применения имитационного моделирования для создания цифрового двойника производственной системы является возможность визуализации получаемых данных. Так, например, при оптимизации материальных потоков цеха по производству деталей из полимерных композиционных материалов, можно наглядно увидеть перемещение деталей по цеху, а также оценить загруженность маршрутов. На рисунке 2 представлена диаграмма загруженности материальных потоков производственной системы.

Цифровой двойник производственной системы будет работать наилучшим образом, если он имеет двустороннюю связь с производством. Одной из таких связей может быть планирование с внедрением в цеховой уровень производства.

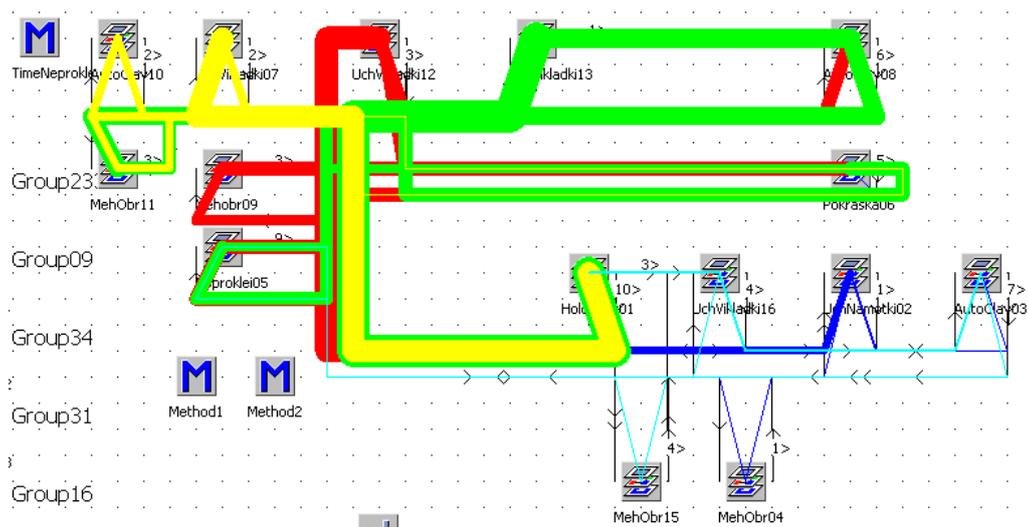


Рис. 2. Материальные потоки производства

Планирование с применением цифрового двойника производства

Учитывая важнейшую особенность цифрового двойника производства – точность представления реальной системы, можно с высокой эффективностью производить планирование производственных процессов. При этом точность планирования будет зависеть только от точности исходных данных.

Разработка плана работы производственного подразделения с использованием готовой имитационной модели не является трудоемкой задачей. Однако в процессе использования подобного плана возникает много трудностей. В первую очередь возникает проблема подготовки сменно-суточных заданий. Стандартные компоненты программного средства имитационного моделирования не поддерживают выведение плановых заданий в формы, используемые на авиастроительном производстве. Ручной вывод плана является слишком трудоемкой задачей. Модернизация программного средства с целью автоматического вывода

данных в необходимой форме является трудоемкой задачей и, в конечном итоге, приводит к использованию бумажных технологий при выдаче заданий.

Вторая проблема возникает при невозможности выполнения разработанного плана. Такая проблема возникает в случае выхода из строя оборудования, нехватки материалов или заготовок, изнашивания инструмента и т.д. Многие факторы, влияющие на возникновение проблемы, можно заранее рассчитать с использованием цифрового двойника. Но, например, для мало автоматизированных производств, невозможно учесть все факторы.

Для решения подобных проблем предлагается использовать автоматизированную систему планирования с использованием цифрового двойника производства. Цифровой двойник производства, при этом, выступает основой всей автоматизированной системы. Для обеспечения взаимодействия двойника с планово-диспетчерским отделом и цеховым уровнем производства разработаны два программных клиента. На рисунке 3 представлен программный клиент, предназначенный для планово-диспетчерского отдела.

Действия Данные

Соединить с PS

Закрыть соединение с PS

Запрос на обновление плана

Загрузить данные из БД

InfoBox

Инвентарный номер: i12502

Дата: Все

Смена: Все

Деталь готова

Название оборудования: DMU125

Доступность: доступно

Размер стола: 125

Инвентарный номер: i12502

	Number	Время начала	Время	Дата начала	Дата	Смена начала	Смена
1	A148_00_3702_201_003	0.0000	2:58:30.0000	2006/01/02	2006/01/02	1	1
2	A148_01_0810_662_003	2:58:30.0001	8:43:00.0001	2006/01/02	2006/01/02	1	2
3	A148_00_3702_201_008	8:43:00.0002	9:38:15.0002	2006/01/02	2006/01/02	2	2
4	A148_01_0510_191_001	9:38:15.0003	17:26:27.0003	2006/01/02	2006/01/02	2	3
5	S148_00_0500_106_001	17:26:27.0004	15:20:27.0004	2006/01/02	2006/01/03	3	2
6	A148_01_0820_102_003	15:20:27.0005	5:00:27.0005	2006/01/03	2006/01/04	2	1
7	T148_00_3735_011_006	5:00:27.0006	9:33:09.0006	2006/01/04	2006/01/05	1	2
8	T148_00_3702_T148_003	9:33:09.0007	2:15:09.0007	2006/01/05	2006/01/07	2	1
9	T148_00_3735_014_005	2:15:09.0008	6:59:09.0008	2006/01/07	2006/01/08	1	1
1	T148_00_6915_003	6:59:09.0009	9:59:51.0009	2006/01/08	2006/01/08	1	2
1	T148_00_7612_022_002	9:59:51.0010	12:16:21.0010	2006/01/08	2006/01/08	2	2
1	T148_00_7612_027_002	12:16:21.0011	13:40:51.0011	2006/01/08	2006/01/08	2	2

Сентябрь 2018

Пн Вт Ср Чт Пт Сб Вс

27 28 29 30 31 1 2

3 4 5 6 7 8 9

10 11 12 13 14 15 16

17 18 19 20 21 22 23

24 25 26 27 28 29 30

1 2 3 4 5 6 7

Сегодня: 18.09.2018

Рис. 3. Программный клиент планового отдела

Представленный программный клиент позволяет в автоматическом режиме составлять планы производственных процессов предприятия. Одним из важнейших преимуществ программного клиента является отсутствие необходимости в прямом взаимодействии с имитационной моделью. Это значительно облегчает подготовку специалиста по работе с автоматизированной системой планирования.

Для разработки плана работы производственного подразделения достаточно выбрать интересующий период планирования и нажать кнопку запуска планирования. В результате имитационная модель автоматически рассчитает оптимизированный производственный план. В зависимости от конкретной производственной системы могут дорабатываться исходные данные для планирования. Помимо периода планирования могут выбираться предпочтительные технологические маршруты, изменяться время технологических операций, определяться используемый инструмент и т.д. По умолчанию все эти данные выбираются исходя из критерия оптимизации, который также может быть настроен.

В результате планирования специалист планово-диспетчерского отдела получает информацию по всем интересующим его производственным процессам. В случае если какие-либо решения в разработанном производственном плане его не устраивают, то он может изменить параметры и перезапустить планирование.

Важной особенностью разработанной системы автоматизированного планирования является программный клиент цехового уровня. Полученный производственный план автоматически загружается в информационные терминалы, которые установлены в цехах и на участках. На рисунке 4 представлен вид программного клиента цехового уровня.

	№ Детали	Время начала	Время завершения
Деталь изготавливается	Деталь0	08:00:00	08:30:00
	Деталь1	08:30:00	09:00:00
	Деталь2	09:00:00	09:30:00
Деталь готова	Деталь3	09:30:00	10:00:00
	Деталь4	10:00:00	10:30:00
	Деталь5	10:30:00	11:00:00
	Деталь6	11:00:00	11:30:00
	Деталь7	11:30:00	12:00:00
Оборудование остановлено	Деталь8	12:00:00	12:30:00
	Деталь9	12:30:00	13:00:00
	Деталь10	13:00:00	13:30:00
	Деталь11	13:30:00	14:00:00

Рис. 4. Пример работы программного клиента цехового уровня

Программным клиентом цехового уровня могут пользоваться все работники предприятия. С помощью информационных терминалов обеспечивается автоматическая передача сменно – суточных заданий на цеховой уровень. Каждый работник видит на терминале свой сменный план. Также информационный терминал используется для отметок о уже проделанной работе. Работник отмечает проделанную работу, и информация автоматически передается на сервер. В результате, если необходим перерасчет плана, то уже выполненная работа не принимает в нем участия.

В том случае, если какую-то работу невозможно выполнить, то работник также отмечает это в информационном терминале. Данная информация автоматически становится доступна специалисту планово-диспетчерского отдела. Программный клиент позволяет либо автоматически запускать процедуру перепланирования в случае срыва плана, либо по решению специалист планово-диспетчерского отдела. Во время расчета нового плана доступ к данным на сервере

и к имитационной модели блокируется, что обеспечивает единство производственной информации. В результате описанного способа обмена информацией цифровой двойник производства постоянно обновляется и содержит актуальную информацию.

Описанная система планирования показывает высокую точность при комплексном применении. Так, например, при планировании производственных процессов цеха по производству деталей из полимерных композиционных материалов цифровой двойник содержал информацию по всей производственной системе. Поэтому, при составлении плана работ для одного из участков, рассчитывались все возможные пути пересечения материальных потоков других участков.

Применение автоматизированного планирования производственных процессов цеха по производству деталей из полимерных композиционных материалов значительно повысил точность расчета сроков получения готовой продукции.

Выводы

Цифровой двойник производства, основанный на применении имитационной модели, обладает многими преимуществами при исследовании производственных систем. Еще одним важным преимуществом является возможность его использования для планирования производственных процессов. Учитывая все данные и специфику авиастроительных предприятий, цифровой двойник обеспечивает точность и скорость планирования производственных процессов.

Внедрение программных клиентов, обеспечивающих взаимодействие с цифровым двойником предприятия, позволяет в значительной степени расширить область применения двойника, а также снизить требования к квалификации специалистов. Программные клиенты для автоматизированной системы планирования обеспечивают оперативный контроль исполнения плана, а также, в случае необходимости, оперативную оптимизацию производственного плана.

Библиографический список

1. Dr. D. Rajasekar, Dr. R. Suresh A study on post implementation benefits of ERP in manufacturing // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 2017, vol. 8, no. 12, pp. 451 - 464.
2. Wang D.Q. et al. Research and Development of Mes System for Gearbox Production Line // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2013, vol. 385, pp. 1827 - 1830.
3. Morita D., Suwa H. An Exact Method for Robust Capacity Requirements Planning // International Journal of Automation Technology, 2015, vol. 9, vol. 3, pp. 216 - 221.
4. Huang X. et al. A New Capacity Requirements Planning Algorithm Based on Heuristic Scheduling // Recent Advances in Computer Science and Information Engineering, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 373 - 381.
5. Jodlbauer H., Reitner S. Material and capacity requirements planning with dynamic lead times // International Journal of Production Research, 2012, vol. 50, no. 16, pp. 4477 - 4492.

6. Chansombat S. et al. A Hybrid Discrete Bat Algorithm with Krill Herd-based advanced planning and scheduling tool for the capital goods industry // International Journal of Production Research, 2018, doi: [10.1080/00207543.2018.1471240](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471240)
7. Kristensen J., Asmussen J.N., Wæhrens B.V. The link between the use of advanced planning and scheduling (APS) modules and factory context // Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2017 IEEE International Conference on, IEEE, 2017, pp. 634 - 638.
8. de Man J.C., Strandhagen J.O. Spreadsheet Application still dominates Enterprise Resource Planning and Advanced Planning Systems // IFAC-PapersOnLine, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1224 - 1229.
9. Haijun Y. et al. An application technology research about FO/AO based on MES system // Control Science and Systems Engineering (ICCSSE), 2017 3rd IEEE International Conference on, IEEE, 2017, pp. 737 - 742, doi:10.1109/ccsse.2017.8088032
10. Михайлова Э.А., Сбитнев С.Н. Проектно-процесный подход к управлению на предприятии авиадвигателестроения // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41543>
11. Krenczyk D. et al. Integration of scheduling and discrete event simulation systems to improve production flow planning // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2016, vol. 145, no. 2, pp. 022018.
12. Бабина О.И. Обзор имитационных моделей в планировании на предприятии // Фундаментальные исследования. 2015. № 12 (6). С. 1173 - 1178.

13. Собенина О.В., Пак А.А. Разработка имитационной модели участка механической обработки // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 4. С. 164 - 167.
14. Чижов М.И., Скрипченко Ю.С., Гусев П.Ю. Моделирование технологических процессов в Tecnomatix Plant Simulation // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 12-2. С. 18 - 20.
15. Сергеев А.И. Направление развития имитационного моделирования в разрезе компьютерной интеграции производства // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии». - Оренбург: ОГУ, 2015. С. 206 - 212.
16. Miller A.M.D., Alvarez R., Hartman N. Towards an extended model-based definition for the digital twin // Computer-Aided Design and Applications, 2018, vol. 15, issue 6, pp. 880 - 891.
17. Kockmann N. 100% Digital Process Industry—Impressions and Results from the Tutzing Symposium 2018 // Chemie Ingenieur Technik, 2018, vol. 90, no. 11, pp. 1621 - 1627.
18. Pereverzev P., Akintseva A., Alsigar M. Improvement of the quality of designed cylindrical grinding cycle with traverse feeding based on the use of digital twin options // MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018, vol. 224, pp. 01033.
19. Biesinger F. et al. A Case Study for a Digital Twin of Body-in-White Production Systems General Concept for Automated Updating of Planning Projects in the Digital Factory // 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), IEEE, 2018, 4-7 September 2018, Torino, Italy, available at:

https://www.ias.unistuttgart.de/dokumente/publikationen/2018_A_Case_Study_for_a_Digital_Twin_of_Body-in-White_Production_Systems.pdf

20. Leng J. et al. Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop // Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2018, doi: 10.1007/s12652-018-0881-5

21. Загидулин А.Р., Подружин Е.Г., Левин В.Е. Моделирование движения несвободной системы твёрдых тел на примере расчёта амортизации шасси лёгкого самолёта // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=98881>

22. Полоник Е.Н., Суренский Е.А., Федотов А.А. Автоматизация расчетов усталостной долговечности элементов авиаконструкций с геометрическими концентраторами напряжений // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67799>

23. Чижов М.И., Скрипченко Ю.С., Гусев П.Ю. Имитационное моделирование производства деталей из полимерных композиционных материалов // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 2. С. 245 - 252.

Статья поступила в редакцию 03.12.2019