

## АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗАКАЗНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

О.В. Колесникова, В.Е. Лелюхин (ФГАОУ ВО Дальневосточный федеральный университет)

Излагаются результаты теоретических исследований, разработок и практической реализации автоматизированных систем управления предприятиями с использованием гибридных технологий на основе цифровых двойников в русле концепции Industry 4.0. Рассматривается оригинальная концепция автоматизации управления производством на машиностроительном заводе с применением интегрированного ядра управления, представленного в виде цифрового двойника производства. В любой момент времени ядро управления отображает текущее состояние производственного процесса всего предприятия. Система построена по схеме программного управления с элементом оперативной корректировки отклонений от заданной программы независимо от причин их возникновения.

Ключевые слова: машиностроение, позаказное производство, автоматизация производства, интеграция управления, ядро управления, цифровой двойник.

### Введение

В силу различных факторов в нашей стране и за рубежом по числу предприятий и числу работников существенную долю составляют предприятия с мелкосерийным и единичным характером производства. В отличие от массовых и крупносерийных производств важнейшей особенностью таких предприятий является способность в кратчайшие сроки перестраивать технологические операции и оперативно изменять производственные потоки.

Такой тип производства довольно сложен для управления и планирования. Поэтому поиск эффективных методов управления, организации машиностроительного производства, методов построения автоматизированных систем управления производством — актуальная задача. Учитывая высокую сложность управления многочисленными и разноплановыми производственными ресурсами в позаказном

серийном и единичном машиностроении (*NP* сложные задачи), автоматизация этого процесса в значительной мере определяет производственную эффективность.

Создание системы управления производством, интеграция в единую систему задач сбора, обработки данных и оперативного управления повышает качество и эффективность функционирования всех звеньев машиностроительного производства. Поиск и разработка эффективных методов управления представлены в работах отечественных и зарубежных ученых [1, 2, 3].

Предлагаемые на рынке системы автоматизации управления производством (*MRP II*, *MES*, *APS*), несмотря на использование современных математических методов и алгоритмов, вплоть до искусственного интеллекта, концептуально настраиваются на технологическую специализацию с попытками достижения оптимальных результатов, задаваемых набором критериев [4, 5].

Характерными чертами таких систем является: 1) перепланирование в ходе поиска рационального или оптимального результатов, что вызывает необходимость «турбулентных» перестроений в звеньях, напрямую не задействованных в производстве продукции, однако связанных с подготовкой и обеспечением их бесперебойной работы; 2) как правило, формирование планов производства осуществляется в направлении «назад от каким-то образом назначенной даты выпуска продукции», что в принципе не позволяет учесть реальную загрузку производственных мощностей и в конечном итоге ведет к локальным перегрузкам рабочих мест, нарушениям технологии и соответственно к потере качества [6, 7, 8].

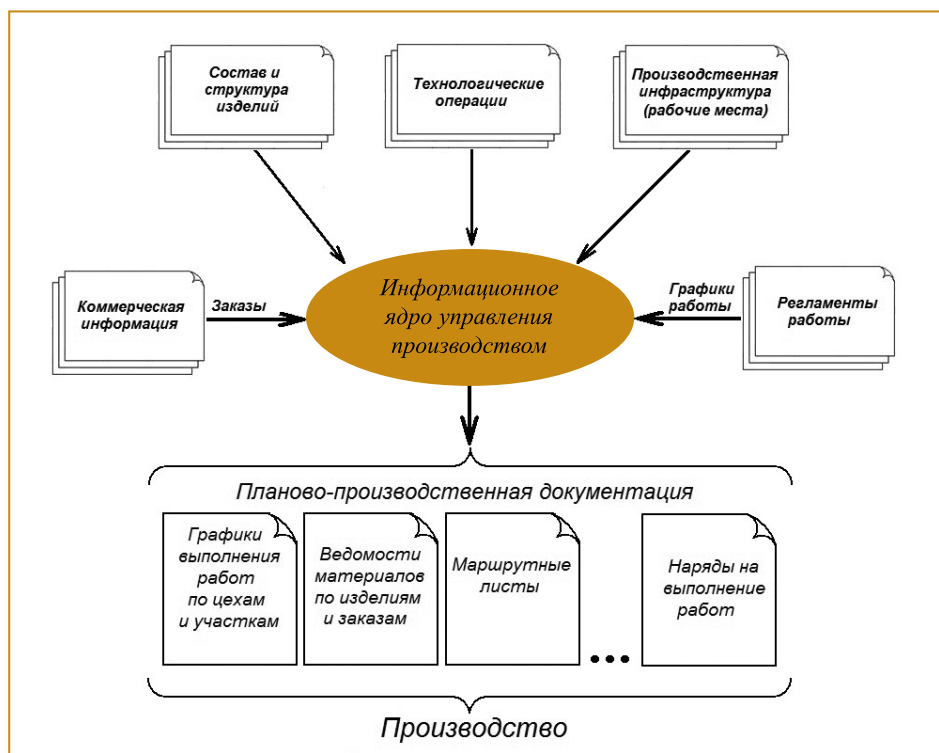


Рис. 1. Схема интеграции систем управления позаказным производством

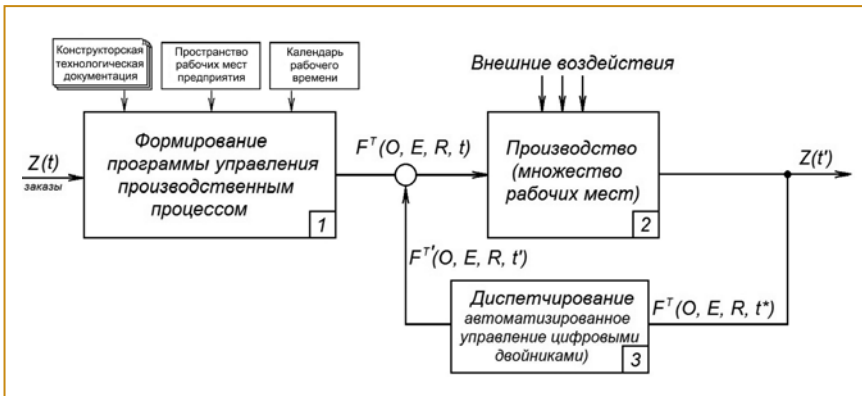


Рис. 2. Структура модели управления производством

### Интеграция управления производственной системой

Для решения указанных проблем предложена концепция интеграции управления всеми основными и вспомогательными звеньями производственной системы на основе единого информационного ядра управления (рис. 1) [8, 9, 10].

Основная идея схемы, показанной на рис. 1 заключается в построении интегрированного информационного ядра управления, которое является цифровым двойником производства.

Для размещения информационного ядра управления (организации производственного процесса) используется двумерное квазиметрическое пространство, одной из размерностей которого является координата реального времени  $t$ , а второй – координата множества рабочих мест  $R$  на предприятии. Источниками информации для управления являются: заказ на производство, состав и структура изделий, соответствующие им технологические операции, множество рабочих мест и регламенты работы предприятия (рис. 1).

Для реализации рассматриваемой концепции на рис. 2 показана структура модели программного управления (блок 1) производством (блок 2) с элементом оперативного регулирования отклонений от заданных регламентов выполнения производственного процесса (блок 3) [8, 10].

Как видно на рис. 2, управление осуществляется посредством размещения технологических потоков  $F^T(O, E, R, t)$  (блок 1) в ядре управления. Здесь  $O := \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$ ,  $o_j \in O$  – множество технологических операций;  $E := \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ ,  $e_j \in E$  – множество отношений между операциями;  $R := \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ ,  $r_l \in R$  – множество рабочих мест.

Наличие автоматизированной подсистемы оперативного управления (рис. 2, блок 3) обеспечивает компьютерный поиск эффективного решения в случаях возникновения отклонений в технологических потоках. При этом корректировка осуществляется со смещением по временной оси на величину  $\Delta t$  непосредственно в ядре управления в виде  $F^T(O, E, R, t)$ . Иными словами, автоматический поиск вариантов решений выполняется с учетом отношений порядка следования всей цепочки детали-операций до

корневой вершины графа-дерева производственной структуры изделия, что невозможно при «ручном управлении».

### Формирование программы управления производством с помощью цифрового двойника

Если рассматривать систему управления всем производственным процессом предприятия, то в каждый момент времени на одной производственной площадке (множество рабочих мест  $R$ ) изготавливается несколько изделий в соответствии с заказами. В этом случае для любого

промежутка времени производственный процесс формально представляется как полное множество технологических потоков, выполняемых одновременно по всем заказам.

В качестве технологического потока  $f_i^T$  рассматривается совокупность детали-операций для одной детали-сборочной единицы (ДСЕ). Производственная структура изделия формируется в виде совокупности технологических потоков, порядок следования которых определяется электронной структурой изделия (ЭСИ). Производственная структура изделия представляется в виде графа дерева, вершинами которого являются детали-операции (рис. 3) [6, 7, 10].

Главной задачей формирования программы управления является расстановка детали-операций в пространстве ядра управления при соблюдении комплекса ограничений [6, 9, 10].

Этот процесс можно представить формально. Имеется множество рабочих мест  $R$ . Их способность выполнять некоторые работы характеризуется интервалом доступности, то есть режимом работы оборудования или рабочих мест. Режим работы устанавливается на предприятии в виде определенного регламента, определяющего продолжительность работы, число смен, обеденные и прочие перерывы и т.д. Соответственно, время доступности всех рабочих мест может быть описано множеством  $T := \{t_{r_1}, t_{r_2}, \dots, t_{r_m}\}$ , где каждому рабочему месту соответствует его режим работы.

Занятость рабочего места означает выполнение на этом рабочем месте технологической операции, которая характеризуется длительностью выполнения. Совокупность выполняемых операций на рабочем месте и определяет загрузку или расписание работы рабочего места. График загрузки отдельного рабочего места  $p_{r_i}$  представляет собой совокупность интервалов занятости выполнением некоторых операций. Причем все интервалы занятости рабочего места должны укладываться в соответствующий режим работы  $t_{r_i}$ .

На рис. 3 показан фрагмент размещения производственной структуры изделия, состоящего из восьми ДСЕ (обозначены буквами:  $A, B, C, D, E, F, J, K$ ) и 19 детали-операций (обозначены буквой и цифрой:

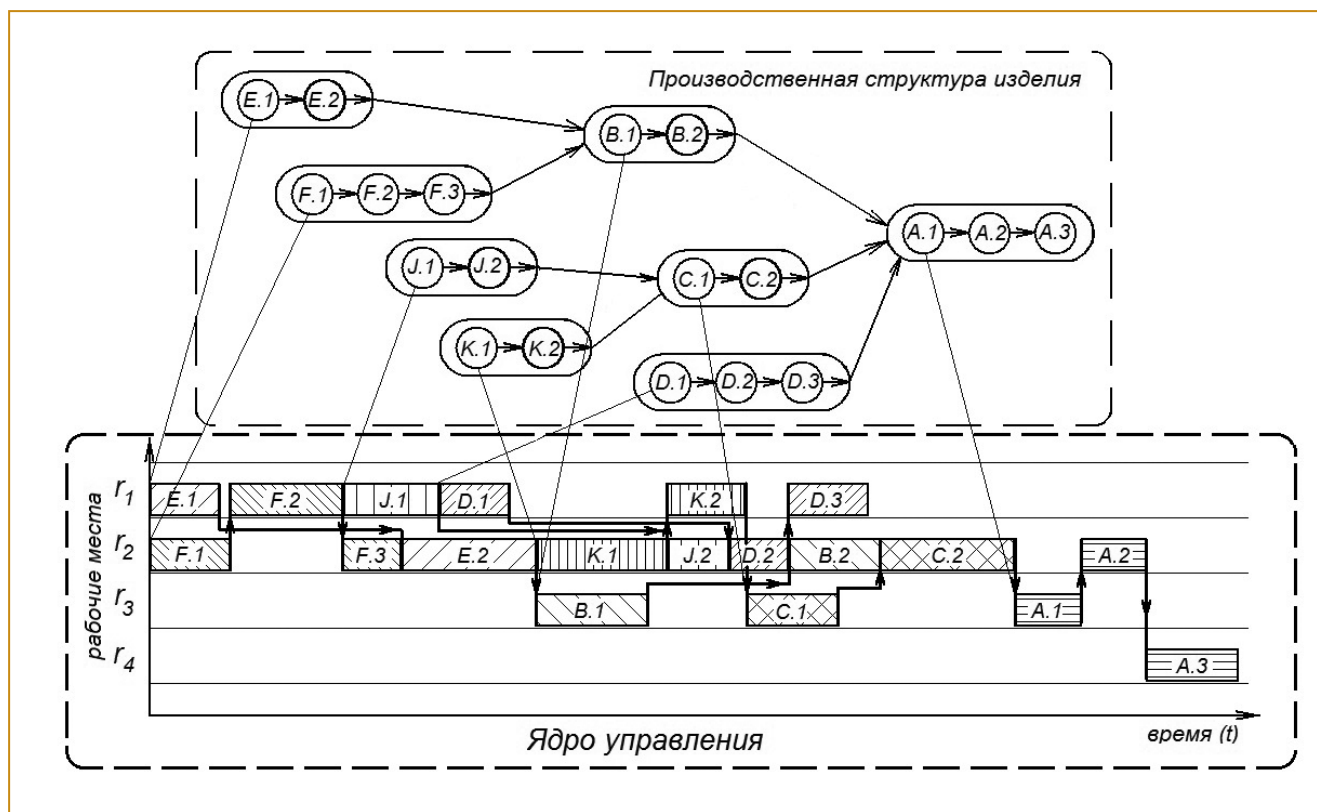


Рис. 3. Фрагмент формирования программы управления производством

например,  $J.1$ , ...,  $F.3$ ,  $B.1$ , ... и т.д.) в пространстве ядра управления. Для максимизации загрузки рабочих мест и минимизации длины технологического цикла изготовления изделий используется эвристический алгоритм «Опадающие листья», моделирующий «послойное срезание» вершин графа дерева [6, 7].

Как показано на рис. 3, в соответствии с упомянутым алгоритмом, первой изготавливается деталь  $F$ . Поэтому на рабочем месте  $r_2$  размещается деталирование-операция  $F.1$ , затем на рабочем месте  $r_1$  размещается деталирование-операция  $F.2$ , по окончании которой деталь возвращается на рабочее место  $r_2$ , где выполняется операция  $F.3$ . Следующей изготавливается деталь  $E$ , и её первая операция  $E.1$  размещается на рабочем месте  $r_1$ . Однако при размещении второй операции  $E.2$  на рабочем месте  $r_2$  возникает временная задержка, поскольку промежуток времени между операциями  $F.1$  и  $F.3$  оказывается меньше времени её выполнения. Поэтому операция  $E.2$  размещается после окончания  $F.3$ . Аналогично выполняется размещение всех остальных деталирование-операций изделия.

Таким образом при получении нового заказа формируется новое состояние ядра управления, которое при отсутствии «производственных» отклонений является полным цифровым двойником производственного процесса.

#### Оперативная корректировка цифрового двойника

В случаях возникновения отклонений в производстве от сформированной программы в результате

воздействия различных факторов нарушается соответствие между цифровым образом и реальным состоянием, для компенсации расхождений необходима оперативная корректировка цифрового двойника.

Рассмотрим ситуацию появления отклонения при выполнении производственного графика (рис. 4), с последующей корректировкой состояния ядра управления.

Предположим, что по какой-то причине не состоялось выполнение деталирование-операции  $J.1$  на рабочем месте  $r_j$ . Для выполнения этой операции необходимо подобрать промежуток на временной оси  $t$  ядра управления. Исходя из критериев минимизации технологического цикла изготовления изделий и максимизации сменной загрузки рабочих мест желательно найти ближайший незанятый (свободный) участок рабочего места  $r_j$  во времени (ось  $t$ ).

На рис. 4 видно, что в рассматриваемом случае существует возможность оперативной корректировки отклонения посредством перестановки только одного (первого) звена  $J.1$  дефектной цепи (перемещение указано утолщенной пунктирной стрелкой). Однако это возможно исключительно, если время принятия управляющего решения не превышает величины  $t_{пр}$  от момента возникновения отклонения, которое определяется разностью между временем начала выполнения операции  $J.1^*$  и временем окончания операции  $J.1$  (рис. 3).

В реальных производственных условиях минимальная величина этого времени может исчисляться

несколькими минутами. Отметим, что за время  $t_{упр}$  необходимо выполнить ряд последовательных процедур:

- 1) обнаружить событие (отклонение в производственном графике);
- 2) выполнить поиск дефектной цепи;
- 3) найти приемлемое решение для «компенсации» отклонения;
- 4) внести изменение в ядро планирования;
- 5) оповестить исполнителей об изменении в производственном графике.

Рассмотренный вариант управления (рис. 4) позволяет выполнить корректировку состояния ядра управления без изменения сроков окончания изготовления изделия.

#### Система автоматизации управления производством на базе 1С

Рассмотренная модель интегрированного управления производством реализована в программном комплексе 1С:УПП, используется на машиностроительном предприятии АО «Дальрыбтехцентр» (г. Владивосток) на протяжении семи лет для автоматического формирования плано-производственной документации и служит основой управления производственными и технологическими ресурсами [8, 9].

На рис. 5 показана форма визуализации и фрагмент загрузки рабочих мест предприятия, здесь цветами обозначены детали-операции для изделий различных заказов.

Формируемый цифровой двойник отражает плано-состояние производственного процесса. В настоящее время ведутся работы по автоматизации оперативного управления цифровым двойником.

Для регистрации и регулирования возникающих отклонений необходима фиксация реального состояния производственной системы в процессе ее функционирования. С этой целью разработаны модули взаимодействия пользователей с цифровым двойником (рис. 6), позволяющие регистрировать факт выполнения технологических операций и изготовления детали-сборочных единиц. Разработанные модули выполняют функцию сбора значений контролируемых параметров системы.

В качестве основных контролируемых параметров выступают время начала и окончания выполнения технологической операции. Полученные данные сравниваются с плановым цифровым двойником автоматической подсистемой контроля, что позволяет обнаруживать отклонения в производственном графике. Обнаруженное событие (отклонение в производственном графике) запускает подсистему управления отклонениями, которая, в свою очередь, позволяет реализовать оперативную корректировку цифрового двойника. Подсистема управления отклонениями будет выполнять поиск дефектной цепи и предлагать возможные решения для «компенсации» отклонений. Варианты решений будут предлагаться диспетчеру для выбора. В зависимости от выбранного диспетчером варианта модули подсистемы

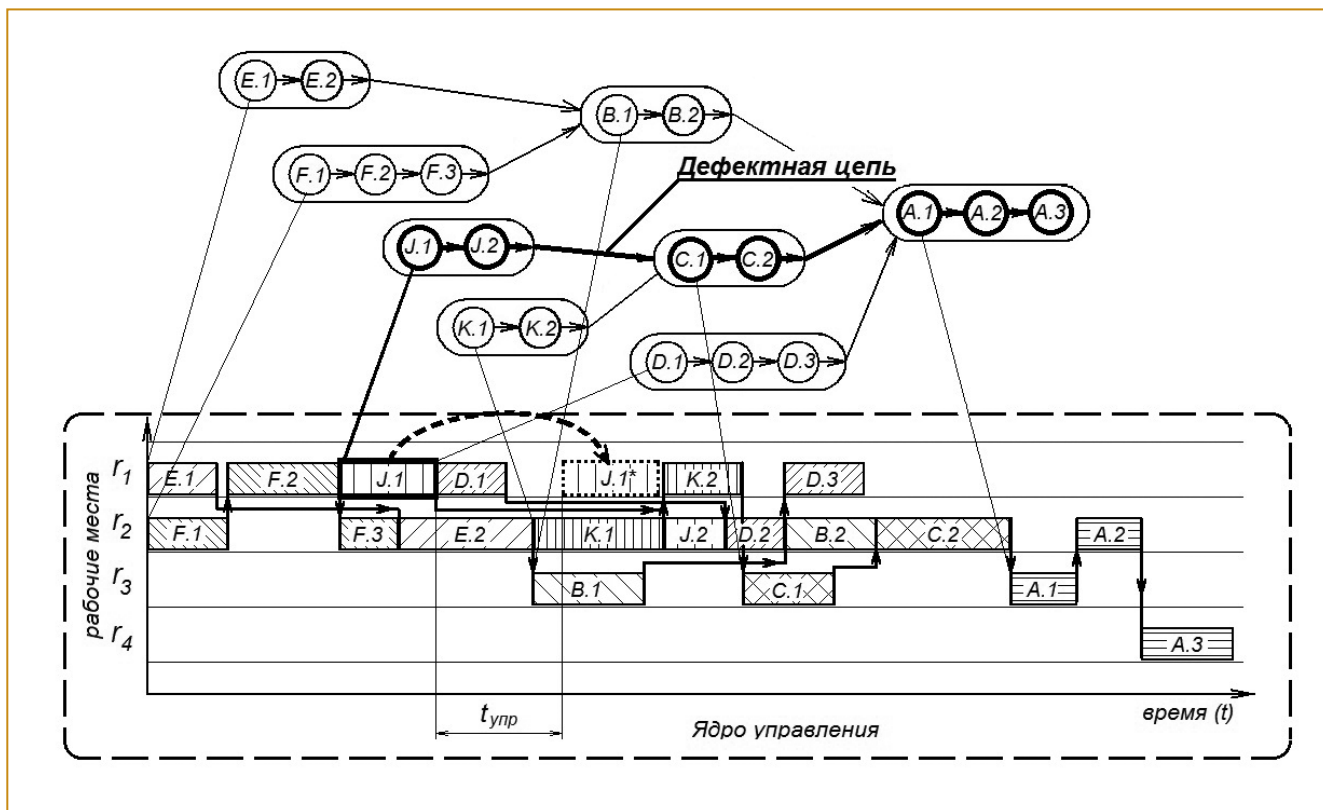


Рис. 4. Дефектная цепь и схема корректировки ядра управления

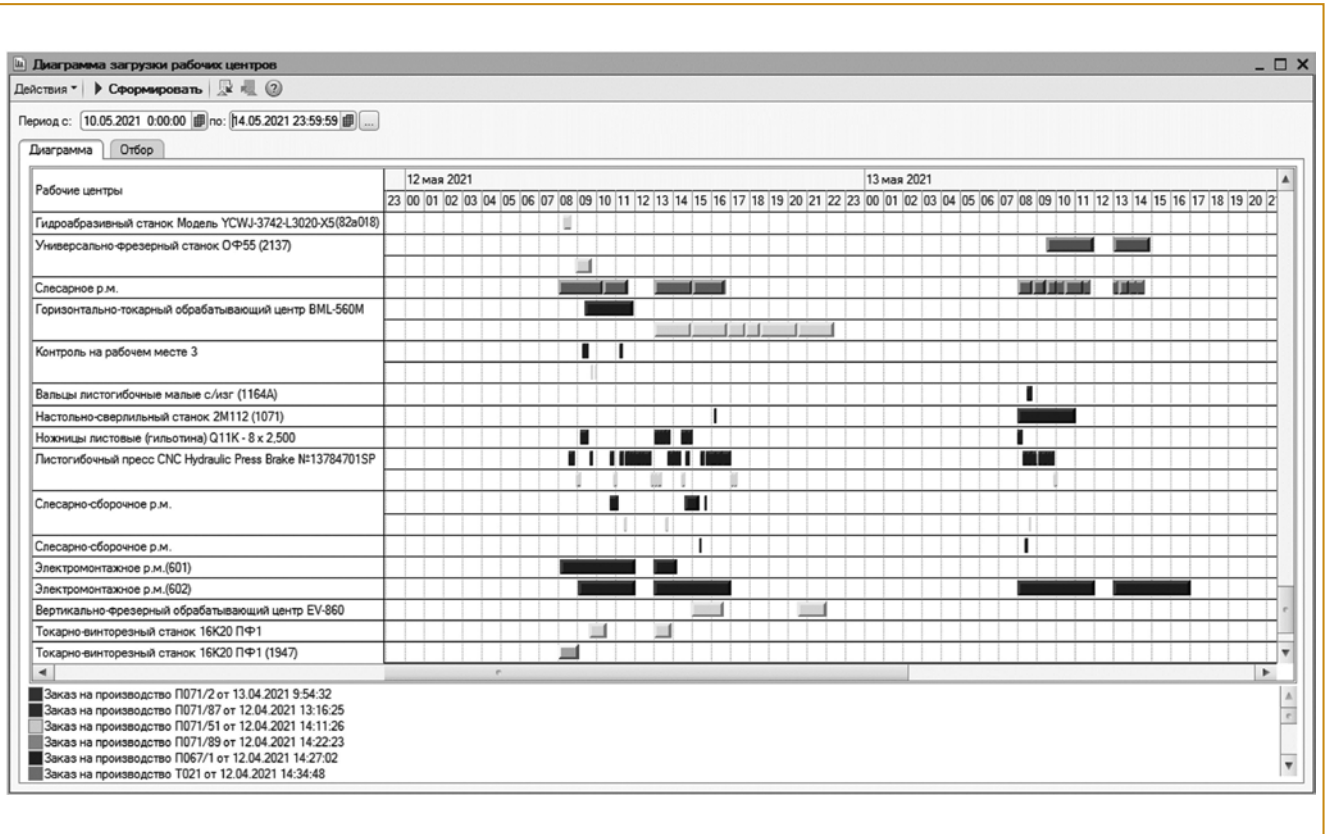


Рис. 5. Визуализация фрагмента производственного плана

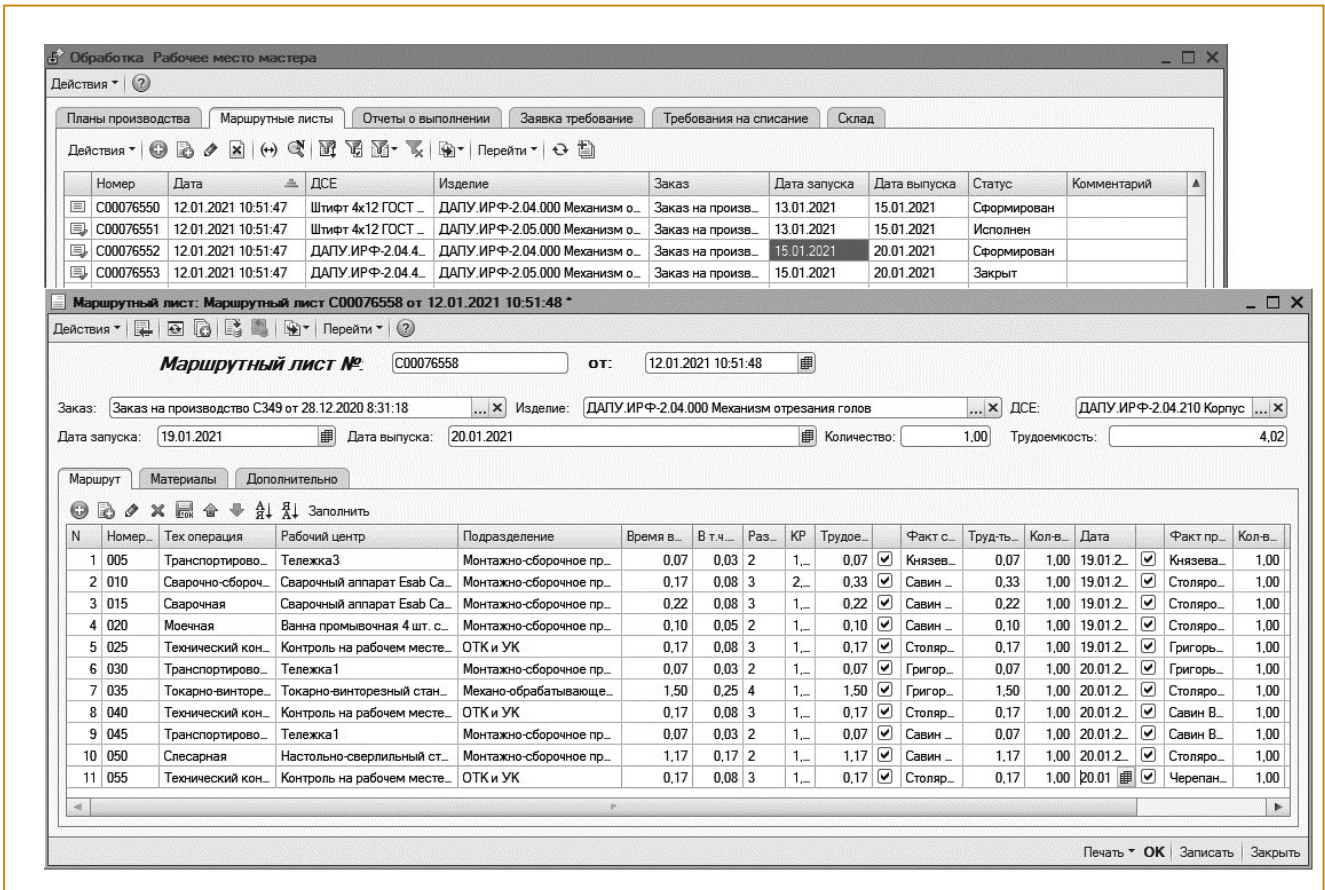


Рис. 6. Формы взаимодействия пользователя с цифровым двойником

регулирования отклонений будут производить корректировку ядра управления с оповещением исполнителей об изменении в производственном графике.

Для реализации системы оперативного управления в соответствии с рассмотренными в работе алгоритмами корректировки отклонений предусматривается разработка программных модулей на платформе 1С:УПП, что обеспечит согласование программных средств с минимизацией затрат.

#### Заключение

Предложенная в статье концепция автоматизированного формирования и управления цифровым двойником учитывает особенности позаказного мелкосерийного и единичного машиностроительного производства. Разработанный подход базируется на идее стабильности плана и минимизации или полного отсутствия операций перепланирования. Данный подход в условиях позаказного производства позволяет организовать эффективную работу и взаимодействие всех служб предприятия. Предложенный алгоритм нивелирования отклонений путем встраивания невыполненных операций в свободные промежутки ядра управления, позволяет минимизировать изменения в графике производства и планах работы взаимосвязанных служб предприятия.

Предложенный подход может быть с успехом применен при разработке цифровых двойников производства и методов управления ими. Разрабатываемая и внедряемая авторами система управления на базе 1С:УПП на предприятии АО «Дальрыбтехцентр» показывает жизнеспособность и эффективность данной концепции.

#### Список литературы

1. Мухин В. И. Исследование систем управления: Уч. для вузов / В.И. Мухин — М.: Изд. «Экзамен», 2003. — 384 с.

2. Системный подход к организации управления / Под ред. Мильнер Б.З., Евенко Л.И., Рапопорт В.С. — М.: Экономика, 1983. — 224 с.
3. Demeulemeester Erik L., Herroelen Willy S. Project Scheduling: a Research Handbook. New York; Boston; Dordrecht; London; Moscow: Kluwer Acad. Publ., 2002. 685 p.
4. Фролов Е.Б. Организация производственного процесса на предприятии при помощи метода вычисляемых приоритетов. / Е.Б Фролов, Ю.А. Тихонова, А.А. Корниенко // Вестник МГТУ «Станкин». — 2012. — № 1(19) — С.73-76.
5. Фролов Е.Б. MES-системы. Вид «сверху», взгляд изнутри. [Электронный ресурс] / Е.Б Фролов, Р.Р. Загидуллин — Режим доступа: <http://12news.ru/doc2689.html>
6. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Алгоритм планирования дискретного машиностроительного производства «Опадающие листья». // Автоматизация. Современные технологии, М.: Изд-во «Инновационное машиностроение». 2016. № 1. с.15-19.
7. Lelyukhin V., Kolesnikova O. Approach to Determining Order of Production of Parts and Assembly Units of Engineering Products in Production Process Planning // Procedia Engineering. — Vol. 206, 2017, P. 1515–1521
8. Колесникова О.В., Лелюхин В.Е. Синхронное управление ресурсами предприятия в машиностроении // Автоматизация в промышленности. 2015. № 3. С. 59-62.
9. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Цифровое информационное пространство управления производством морской техники // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2-2 (44). С. 45-49.
10. Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Интегрированная система конструкторско-технологической подготовки и управления производством на платформе 1С:УПП // Автоматизация в промышленности. 2015. № 9. С. 45-49.

*Лелюхин Владимир Егорович — канд. техн. наук, доцент,*

*Колесникова Ольга Валерьевна - канд. техн. наук, доцент департамента компьютерно-интегрированных производственных систем Дальневосточного федерального университета (г. Владивосток).*

*E-mail: lelv0@mail.ru, miis@mail.ru*

#### «Запсибнефтехим» увеличит производство полипропилена при помощи технологии Honeywell UOP

Компания Honeywell объявила, что ООО «Запсиб-Нефтехим» (входит в ПАО «СИБУР Холдинг») проведет реконструкцию одного из своих производств в Западной Сибири, на котором используется технология Honeywell UOP C3 Oleflex™. Реконструкция позволит российской компании увеличить производство пропиленов более чем на 8% — до 561 тыс. т/г. Это поможет удовлетворить растущий спрос на его производные, используемые для производства полимеров.

Компания UOP предоставила лицензию на технологию и предоставит услуги базового проектирования, а также оборудование, катализаторы и адсорбенты для установки.

С 2011 г. большинство новых проектов дегидрирования во всем мире основано на технологии UOP C3 Oleflex. Глобальные производственные мощности по производству пропиленов

по технологии Oleflex в настоящее время составляют около 10,2 млн т/г.

Технология C3 Oleflex компании Honeywell UOP преобразует пропан в пропилен посредством каталитического дегидрирования. Этот процесс позволяет снизить затраты на производство и обеспечивает более высокую окупаемость инвестиций по сравнению с конкурирующими технологиями дегидрирования. Низкий уровень энергопотребления и выбросов, а также полностью перерабатываемая каталитическая система на основе платины и оксида алюминия помогают минимизировать воздействие на окружающую среду. Независимая конструкция реактора и регенерации технологии Oleflex позволяет максимально увеличить эксплуатационную гибкость и надежность на производстве.

[Http://www.honeywell.com](http://www.honeywell.com)