

УДК 338.32:004.942

© В. М. РАМЗАЕВ ¹, И. Н. ХАЙМОВИЧ ^{1,2}, 2020

¹ Самарский университет государственного управления
«Международный институт рынка»
(Университет «МИР»), Россия

^{1,2} Самарский национальный исследовательский
университет им. академика С. П. Королева
(Самарский университет), Россия

E-mail ^{1,2}: kovalek68@mail.ru

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕХОМ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Для производства конкурентоспособной продукции необходимо проводить модернизационные мероприятия по внедрению инновационного, высокоскоростного оборудования. В статье приводится подход к выявлению производственных мощностей на машиностроительном предприятии, подлежащих замене новым оборудованием, в соответствии со стратегией реализации продукции на рынке. Авторами с помощью программы имитационного моделирования AnyLogic 7 выявлена очередность замены оборудования в структуре производственной мощности и таким образом доказано, что данный программный продукт необходим как один из элементов принятия решения организации производства на цеховом уровне.

Ключевые слова: умное производство, матрица БКГ, имитационное моделирование, AnyLogic.

В настоящее время стало актуальным внедрение на российских производственных предприятиях «умного производства», т. е. производства, организованного в едином информационном пространстве комплекса производственных процессов, к которым можно отнести конструкторско-технологическую подготовку производства, технологические процессы, организационно-экономическую подготовку, оперативную диспетчеризацию, управление всей производственно-хозяйственной деятельностью.

Инструментом умного производства является система решения для управления предприятием на основе интеграции IT-технологий, реализующая на своем производстве цепочку CAD/CAE/CAM/PDM/PLM/ERP-систем. Стоит понимать, что умное производство отличается от бережливого производства [1]. В то же время умное

производство состоит из бережливого производства и организованного единого информационного пространства. За счет этого обеспечивается качественный прорыв в технологическом, организационном и управленческом планах в равной мере, включающий в себя только самое необходимое из обеих частей.

Для того чтобы производимая промышленным предприятием продукция была конкурентоспособной, необходимо проводить модернизационные мероприятия по внедрению инновационного, высокоскоростного оборудования. При этом реализация стратегии обновления основных фондов, интегрируемая с системами поддержки IT-технологий (учитывая подход на основе умного производства), будет включать в себя непосредственное внедрение самих IT-технологий на всех уровнях производства [2].

Цель данной работы — сократить производственные издержки путем использования инструментов организационно-экономического моделирования при выявлении производственных мощностей, подлежащих замене новым оборудованием.

Объектом исследования является многономенклатурная производственная система, а *предметом исследования* — моделирование системы управления цехом на машиностроительном предприятии с учетом замены оборудования.

Для решения задачи, поставленной в цели исследования, в качестве примера рассмотрим многономенклатурную производственную систему ПАО «КУЗНЕЦОВ» на основе показателей за 2012-2013 годы (т.к. именно в это время предприятие получило государственную поддержку в размере 1641011 тыс. руб.) [10].

Изменение эффективности производства в сторону модернизации производственных процессов в первую очередь зависит от материально-технической базы, но для ускорения срока окупаемости обновления оборудования необходимо взять в качестве заменяемого объекта оборудование, изготавливающее наибольшее количество изделий. Для этого необходимо определить стратегические единицы, которые имеют большую доходность в рамках производства.

Определим комплекс изделий, пользующийся наибольшим спросом с помощью матрицы Бостонской консалтинговой группы (БКГ), которая с момента создания Брюсом Д. Хендерсоном используется при стратегическом планировании предприятий различных профилей во всем мире. Данная матрица обладает такими преимуществами, как:

— теоретическая проработка взаимосвязи между финансовыми поступлениями и анализируемыми параметрами;

– объективность анализируемых параметров (относительная рыночная доля и темп роста рынка);

– наглядность получаемых результатов и простота построения; сочетает анализ портфеля с моделью жизненного цикла товара; проста и доступна для понимания;

– легко разработать стратегию для бизнес-единиц и инвестиционную политику.

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод о том, что матрица БКГ идеально подходит для анализа приоритетного направления использования денежных средств, которые могут вернуться к предприятию в кратчайшие сроки.

С помощью данных, представленных в таблице 1, построим матрицу БКГ (рис. 1).

Таблица 1

**Консолидированная программа
производства и продаж ПАО «КУЗНЕЦОВ»**

Наименование товарных групп	Выручка, тыс. руб.	
	2012 г.	2013 г.
Двигатели для авиации	2 802 145	3 875 165
Энергетический сегмент	1 666 095	2 573 078
Космический сегмент	2 196 131	2 489 445
Прочее	87 315	198 184

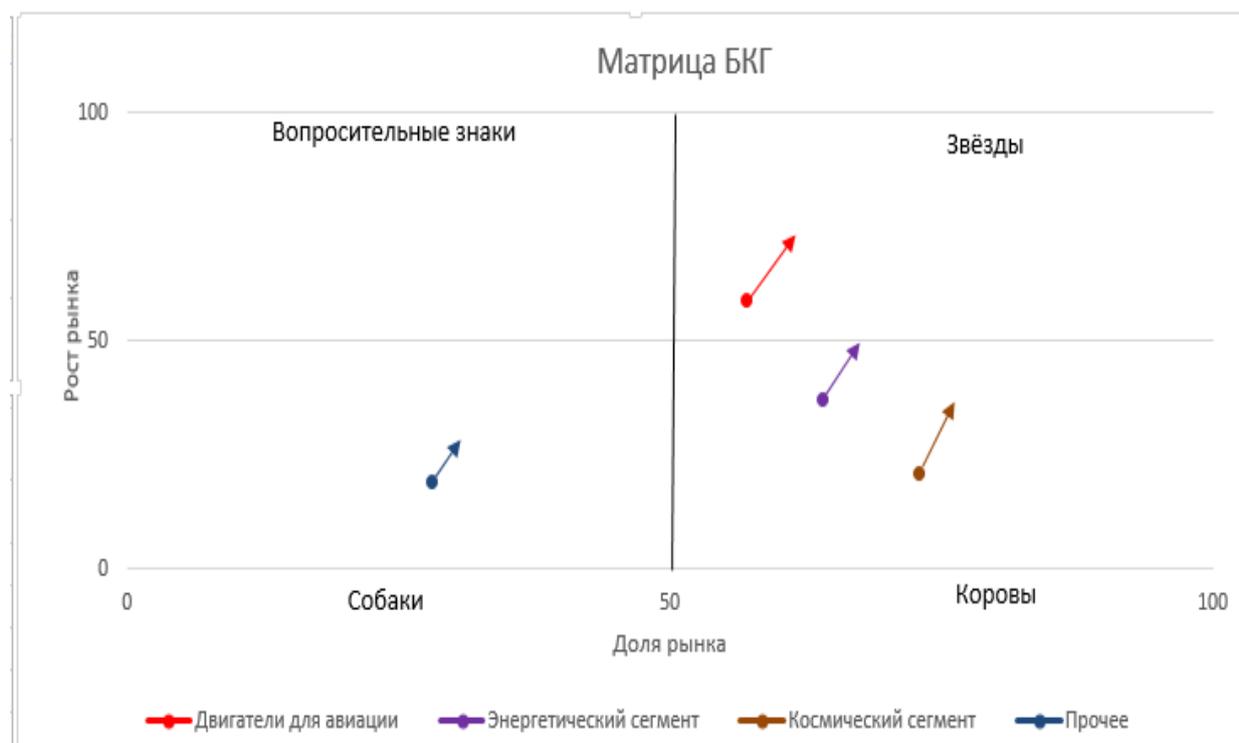


Рис. 1. Матрица БКГ производственной деятельности ПАО «КУЗНЕЦОВ»

Анализ матрицы БКГ показал, что наиболее развивающимся производственным направлением для ПАО «КУЗНЕЦОВ» является изготовление двигателей для авиации, а внедренные в эту область разработки быстрее всего окупятся и принесут прибыль. Также стоит упомянуть об основных рисках технологического и инфраструктурного характера, которые связаны с высоким износом основных средств. В целях минимизации влияния данных рисков на деятельность предприятия планируется проведение следующих мероприятий:

- модернизация оборудования для обеспечения устойчивого высококачественного изготовления деталей серийного производства;

- снижение затрат и производственных циклов;

- капитальный ремонт прессы штамповки деталей камер сгорания;

- уточнение конструкторской и технологической документации по обеспечению требуемого натяга по бандажным полкам рабочих лопаток ротора;

- приобретение современных балансировочных станков;

- реализация плана по реконструкции и модернизации испытательных стендов;

- сотрудничество предприятия с вузами г. Самары, а также обучение, повышение квалификации работников в учебном центре внутри предприятия;

- организация детального сетевого планирования программы производства НК-36СТ с определением «узких мест»;

- реализация кооперации по организации механической обработки средней опоры в необходимых объемах; завершение работ по переходу на литье средней опоры по «выплавляемым моделям» с целью существенного снижения длительности производственного цикла и повышения качества двигателей НК-36СТ;

- работы по планам повышения надежности, техническому совершенствованию и повышению потребительских свойств двигателей НК-14СТ, НК-14СТ-10, НК-36СТ в соответствии с тематическим планом ОКБ инженерного центра.

Все эти мероприятия проводятся в рамках восстановления серийного производства двигателя «Р», а также реконструкции и технического перевооружения производства ракетных двигателей РД-108А/РД-107А.

В рамках данной работы рассматривается проблема определения «узких мест» в организации производства. В настоящее время

мя в серийном производстве существует несколько таких мест, одно из них связано с уменьшением себестоимости технологического процесса изготовления деталей в цехах механообработки [3].

Рассмотрим литейное производство на примере литья цветных сплавов, которое тоже считается одним из узких мест для изделий авиационных двигателей. Для этого проведем исследование технологического процесса изготовления корпуса средней опоры, который используется для сборки авиационных двигателей. Это небольшая деталь (1550x250 мм), но она должна иметь высокие прочностные качества и достаточно низкую массу. Поэтому в качестве материала для изготовления подобных деталей принято использовать магниевые сплавы, которые обладают низким показателем плотности и высокими прочностными характеристиками, особенно в сочетании с другими легирующими элементами.

Технологический маршрут изготовления детали можно разделить на три этапа: создание формы для последующей заливки, заливка и механическая обработка, термообработка и окончательная обработка перед перемещением заготовки в цех механической обработки.

В ПАО «КУЗНЕЦОВ» используется литье магния в песчано-глинистые формы, поэтому процесс изготовления модели состоит из изготовления модельной оснастки, изготовления формовочных и стержневых смесей, изготовления модели и стержней. Подготовка модели для корпуса занимает в среднем пять дней в ускоренном темпе, благодаря чему литейное производство значительно теряет гибкость.

Графически *первый этап* представлен на рисунке 2.

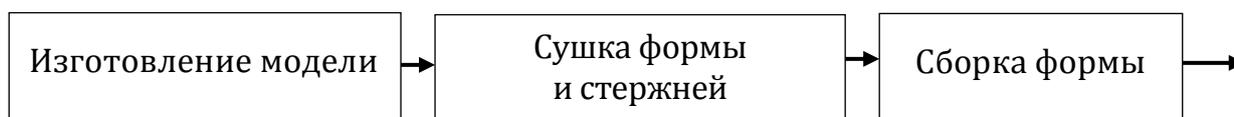


Рис. 2. Первый этап изготовления корпуса средней опоры

Второй этап представляет собой стандартную схему литья (рис. 3). Такая схема встречается при литье практически любого цветного сплава, самый долгий технологический процесс на данном этапе – выбивка. При продолжительности данного этапа около двух дней выбивка занимает целые сутки.

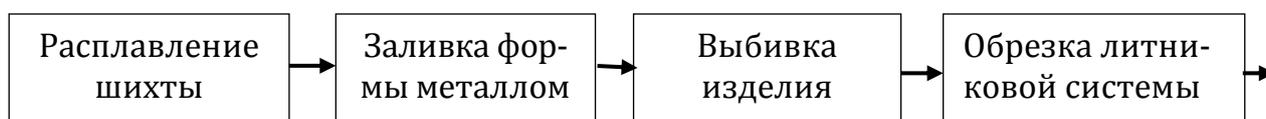


Рис. 3. Второй этап изготовления корпуса средней опоры

Третий этап представляет собой завершающий комплекс технологических мероприятий, направленных на придание изделию необходимых прочностных свойств и окончательную доводку геометрии (рис.4). Данный этап можно назвать самым скоротечным, однако одним из «подводных камней» данного этапа можно назвать рентген, так как на нем можно получить 40% годных изделий, что нежелательно при серийном производстве. Также самым продолжительным технологическим процессом является полировка (16 часов), при которой корпус средней опоры имеет достаточно сложную геометрию, и отклонение от нее недопустимо по конструкционным соображениям. Таким образом, создание одного корпуса средней опоры, не считая обработки в цехе механообработки, составляет 179 часов в сумме, или 22 рабочих дня. Для повышения гибкости отливок и уменьшения трудоемкости их изготовления в цеху можно использовать мастер-модели 3D-принтера еще на этапе конструкторско-технологической подготовки производства, что значительно упростит процесс изготовления, так как весь процесс (проектирование, испытание и изготовление) будет реализован на производстве одним человеком [4].

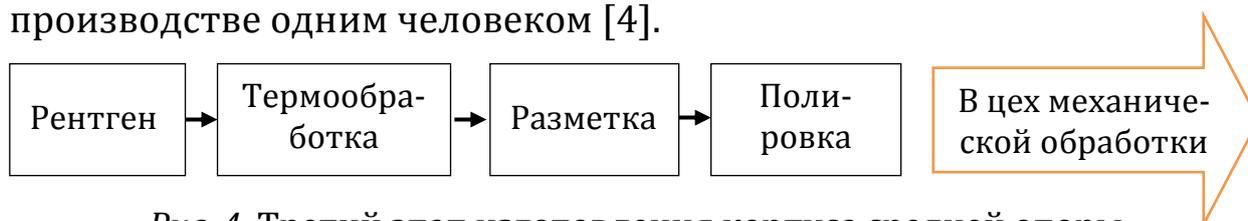


Рис. 4. Третий этап изготовления корпуса средней опоры

Также к узким местам в данном литейном процессе относится процесс литья в песчано-глинистые формы, который уже давно считается устаревшим, так как он является трудоемким, особенно в рамках серийного производства. Одним из больших минусов метода является одноразовость модели.

В настоящее время на предприятиях машиностроительного профиля нашло широкое применение литье цветных сплавов в холодно-твердеющие смеси (ХТС-литье), литье под поршневым давлением с использованием электромагнитных полей высокой частоты, позволяющее получить более равномерные свойства по всем направлениям макрозерна и «литье погружением» [5, 6]. Однако последние два способа сложно реализуемы на практике за счет физико-химической активности магния. В свою очередь, литье в холодно-твердеющие смеси – это технология, похожая на традиционную (литье металла в песчано-глинистые формы), только в виде связующего вещества для смесей песка применяют искусственные смолы. Для отверждения смол применяется продувка стержневых

ящиков различными третичными аминами. Технология литья в ХТС позволяет обеспечить высокое качество поверхности литья, отсутствие газовых дефектов и засоров в отливке. Этот процесс в теории должен значительно ускорить первый этап производственного процесса корпуса средней опоры.

На втором этапе можно уменьшить трудоемкость изготовления практически на каждой технологической операции, кроме заливки. При расплавлении шихты на ПАО «КУЗНЕЦОВ» используется двухочковый стенд, который работает на газе, но если вместо него использовать индукционную печь, то это повысит прочностные характеристики по сечению изделия, а значит и повысит процент годных изделий. Также на этапе выбивки можно использовать новейшие выбивные решетки, которые позволят не только сократить процесс выбивки, но еще и сэкономят электроэнергию. И в заключение, на операции обрезки необходимо внедрить новый токарно-карусельный станок, который позволит значительно повысить качество обработанной поверхности и сэкономит время этапа.

На последнем этапе изготовления невозможно улучшить процесс термообработки вследствие физико-химических свойств МЛ-19. Так же стоит отметить, что в настоящее время в литейной промышленности стало хорошей практикой использование для разметки готовых отливок модельных контрольно-измерительных машин типа «рука», которые позволяют значительно снизить производственные издержки, повысить точность и исключить человеческий фактор. В качестве полировки и окончательной обработки отливки перед транспортировкой в механообрабатывающий цех можно использовать упомянутый выше станок или же станок с ЧПУ с «рукой». Однако данное оборудование имеет достаточно высокую цену и требует дополнительных расчетов.

Одним из простейших способов сравнения существующего и предложенного оборудования является использование имитационного моделирования на моменте проектирования производства на уровне цеха (микроорганизационный уровень). Для имитационного моделирования на уровне цеха рациональнее всего использовать агентное моделирование, которое применяется для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами, а наоборот, эти глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы. Цель агентных моделей — получить представление об этих глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном

поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе. Агент — некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться. В качестве минусов данного подхода стоит отметить, что для него характерны высокий уровень абстракции и использование для моделирования дискретных процессов.

Рассмотрим задачу управления пассивной технологической системой.

Пусть состояние системы описывается переменной $y \in A$, принадлежащей допустимому множеству A . Состояние системы в некоторый момент времени зависит от управляющих воздействий u : $y = F(u)$. Предположим, что на множестве $U \times A$ задан функционал $\Phi(u, y)$, определяющий эффективность функционирования системы. Величина $K(u) = \Phi(u, F(u))$ называется эффективностью управления $u \in U$. Тогда задача управляющего органа заключается в выборе такого допустимого управления, которое максимизировало бы значение его эффективности при условии, что известна реакция системы $F(u)$ на управляющие воздействия:

$$K(u) \rightarrow \max_{u \in U}.$$

Для пассивной части системы зависимость $y = F(u)$ является фактически моделью системы — управляемого объекта, отражающей законы и ограничения ее функционирования [7]. В нашем случае, в качестве целевой функции будет разумно взять время обработки детали:

$$T_{обр} = \sum_{i=1}^{n_{обр}} T_{0i} - T_{выхi},$$

где время обработки будет обратно пропорционально управляющему воздействию:

$$K(u) = \frac{1}{T_{обр}} \rightarrow \max_{u \in U}.$$

Таким образом, получим конечное выражение для нашей целевой функции:

$$T_{обр} = \sum_{i=1}^{n_{обр}} T_{0i} - T_{выхi} \rightarrow \min.$$

В качестве ограничений возьмем следующие выражения:

$$n_{обр.} = \frac{N_{вых}}{N_{вх}} \leq 1 - \text{количество обработанных деталей,}$$

$$\eta = \lim_{N_{скл} \rightarrow 0} \frac{N_{вых}}{N_{скл}} - \text{«КПД» цеха,}$$

где:

$T_{вых}$ — время полного прохождения обработки в цеху;

$N_{вых}$ — количество деталей, прошедших полностью обработку в цеху;

$N_{вх}$ — количество деталей, пришедших в цех;

$N_{скл}$ — количество деталей ушедших на склад из-за занятости станков.

Решить данную задачу на практике возможно с помощью программного комплекса AnyLogic 7.1.1 University [8].

На рисунке 5 представлена задача моделирования литейного цеха в виде простейшей блок-схемы.



Рис. 5. Блок-схема загрузки оборудования в цехе

Для моделирования воспользуемся следующими блоками библиотеки моделирования процесса: Source — в нем будут создаваться заявки; Sink — в нем будут уничтожаться заявки (в другой цех или на склад); Queue — хранит заявки в определенном порядке.

Моделируем очередь заявок, ожидающих приема объектами, следующими за данным в потоковой диаграмме. Также данной модели необходимо добавить логику, для этого в рамках программного комплекса AnyLogic реализовано прикладное программирование на языке Java. Так, создадим новый Java класс, в котором пропишем основные переменные нашей задачи.

Далее необходимо добавить элементы статистики, на основе которых решатель AnyLogic предоставит нам необходимые данные [8]. Для этого из палитры агент перенесем три переменные, которые назовем `col_vixod`, `col_sklad`, `otdacha`. Также пропишем в процессы `source`, `sink1`, `sink` следующие действия, при выходе (`source`) и при входе (`sink`):

`agent.time_vxod=time()` — счетчик времени входа;

`col_sklad=sink1.in.count()` — счетчик количества необработанных заготовок, прибывших на склад;

$time_obrabotki.add(time()-agent.time_vход)$ – расчет времени обработки;

$ver_obrabotki.add(col_vixod/(agent.col_vход+0.01))$ – количество обработанных заготовок;

$otdacha=(col_vixod/(col_sklad+0.01))$ – отношение обработанных заготовок к ушедшим на склад;

$col_vixod=sink.in.count()$ – счетчик вышедших заготовок.

В результате получим производственную модель «как есть» (рис. 6).

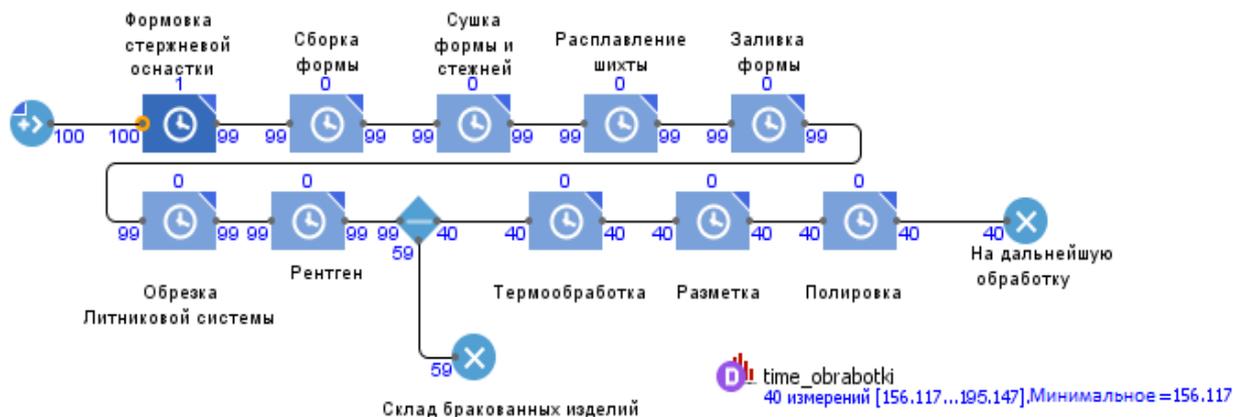


Рис. 6. Старый технологический маршрут изготовления детали (средней опоры)

Из схемы, представленной на рисунке 6, видно, что процент годных изделий составляет около 40% при литье в песчано-глинистую форму. Это является негативным показателем в условиях серийного производства и подтверждает необходимость модернизации. Также весь производственный цикл в лучшем случае занимает около 156 часов.

Далее представлена схема с использованием нового оборудования (рис. 7).

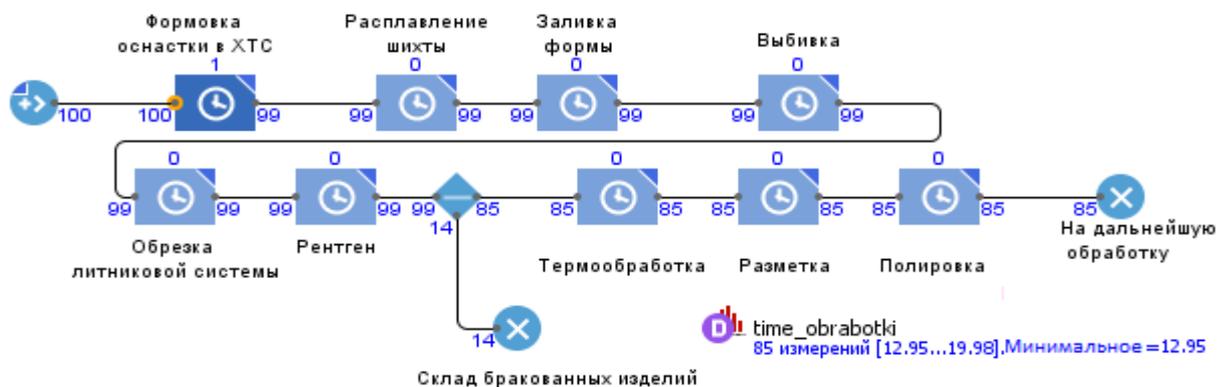


Рис. 7. Обновленный технологический маршрут изготовления детали (средней опоры)

Из схемы, представленной на рисунке 7, видно, что технологический процесс стал эффективнее в разы за счет использования литья в ХТС, а также за счет использования нового оборудования, такого как индукционная печь УИП-500, современная выбивная решетка FAT 422M, карусельный станок для обрезки литниковой системы Knuth PBZ Heavy 2217, мобильная координатно-измерительная машина ROMER Absolute Arm-7520 и обрабатывающий центр LH.AA51.117.

В результате использования имитационных моделей, выявления «узких» мест и перераспределения потоков деталей отмечалось сокращение сроков выпуска продукции в 10 раз.

Другим видом повышения эффективности производственных мощностей по принципам бережливого производства является ликвидация непроизводительных потерь от применения станков нового поколения. Время переналадки оборудования, транспортирования деталей между станками стремительно сокращается за счет универсальности станков: многоосевой обработки, автоматической смены инструмента и пр. На эти станки переводится широкая номенклатура деталей вида «корпус», «цапфа», «крышка», «каркас», «лопатка», «патрубок», «полуфланец», «втулка» и др. Данные детали входят в структуру номенклатурных позиций товарных групп и космического, и энергетического сегмента.

Себестоимости операций рассчитаны на примере изготовления определенной детали типа «корпус средней опоры» на имеющемся оборудовании и новом оборудовании (заменяющем 8 операций).

Для сравнения себестоимостей нового варианта технологического процесса и старого воспользуемся формулой:

$$C = \frac{З}{В},$$

где:

З — производственные затраты, которые, в свою очередь, складываются из:

$$З = К + П + Ш,$$

где:

К — условно постоянные расходы;

П — переменные расходы;

Ш — штрафы, накладываемые на производственную систему;

В — объем выпускаемой продукции, который, в свою очередь, состоит из:

$$В = В_0 \cdot n_{cp} \cdot T,$$

где:

B_0 — производительность одного станка в единицу времени;

n_{cp} — среднее количество станков;

T — время производственного цикла.

Теперь можно найти себестоимость всего технологического процесса:

$$C = \frac{K+П+Ш}{\sum_{i=1}^n B \cdot n_{cp} \cdot T}.$$

Так как для нас имеет большее значение не сама себестоимость процесса, а отношение себестоимости старого технологического процесса к себестоимости нового, расчетная формула примет следующий вид:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{(K_1+П_1+Ш_1)(\sum_{i=1}^9 B \cdot 9 \cdot T)}{(\sum_{i=1}^{10} B \cdot 10 \cdot T)(K_2+П_2+Ш_2)}.$$

Подставив значения, полученные с помощью наших имитационных моделей, мы получим следующее выражение:

$$C_1/C_2 = 0,0205.$$

Такое большое снижение себестоимости вызвано следующими факторами: снижение заработной платы производственных рабочих и наладчиков за счет перехода на литье в холодные твердеющие смеси, что обусловлено увеличением выхода годных изделий и уменьшением численности сотрудников; снижение затрат на ремонт и модернизацию в связи с отсутствием необходимости ремонтировать новое оборудование; снижение затрат на эксплуатацию и ремонт режущих инструментов в результате уменьшения количества используемого оборудования и других затрат [9].

И в заключение нужно отметить, что плановая замена основных фондов обусловлена стратегическим развитием предприятия, которое наглядно представлено с помощью матрицы БКГ — инструмента стратегического планирования и портфельного прогнозирования. На примере консолидированной программы производства с помощью упомянутой выше матрицы была выделена лидирующая область производственной деятельности «авиационный сегмент». На основе выбора наиболее прибыльной группы товаров был произведен отбор 1 детали имеющей широчайшее применение в данном сегменте, а именно — корпуса средней опоры (изделие, применяющееся в любом авиационном двигателе), также с помощью программы имитационного моделирования AnyLogic 7 была выявлена

очередность замены оборудования в структуре производственной мощности.

Литература

1. Хаймович И. Н., Фролов М. А. Предотвращение противоречий при принятии технологического решения в конструкторско-технологической подготовке производства // Вестник Волжского университета имени В. Н. Татищева. 2015. № 1 (23). С. 47-51.

2. Хаймович И. Н., Хаймович А. И. Рационализация организации производства машиностроительного предприятия на основе реинжиниринга // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2006. № 3 (11). С. 53-57.

3. Абрамова И. Г., Абрамов Д. А. Повышение эффективности производственных мощностей в свете реализации технологий бережливого и умного производства // Известия СНЦ РАН. 2013. Т. 15. № 6. С. 557-562.

4. Вдовин Р. А., Смелов В. Г. Совершенствование технологического процесса многономенклатурного производства // Известия СНЦ РАН. 2013. Т. 15. № 6-3. С. 612-619.

5. Гречников Ф. В., Попов И. П., Бибииков А. М., Демьяненко Е. Г., Николенко К. А. Использование способа литья под поршневым давлением для измельчения структуры алюминиевого сплава // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. № 5-2 (36). С. 236-240.

6. Демьяненко Е. Г., Коврижкин Н. И., Попов И. П. Литье погружением в производстве цилиндрических заготовок и прессованных профилей из алюминиевого сплава // Литейное производство. 2013. № 6. С. 25-26.

7. Гречников Ф. В., Хаймович И. Н. Разработка информационных систем управления конструкторско-технологической подготовкой производства как интегрированной базы информационных и функциональных структур // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2008. № 3. С. 34-41.

8. Дровяников В. И., Шляпугин А. Г., Хаймович И. Н. Информационные технологии в промышленном производстве. Самара: СГАУ, 2007. 132 с.

9. Рамзаев В. М., Хаймович И. Н., Чумак П. В. Модели и методы управления энергоэффективностью в организациях с учетом ограниченности инвестиционных ресурсов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 262.

10. Инвестиционные проекты // ПАО «КУЗНЕЦОВ». URL: <http://www.kuznetsov-motors.ru/company/projects>.

Статья поступила в редакцию 13.08.20 г.

*Рекомендуется к опубликованию членом Экспертного совета
канд. экон. наук М. М. Васильевым*