

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ НА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ

Моршнев А.В.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г.Москва*

Ключевые слова: аддитивные технологии, экономическая эффективность, экономический эффект, переменная стоимость времени.

Аннотация. В статье рассмотрено влияние фактора времени на оценку экономической эффективности производственных технологий. Расписан технологический процесс получения детали с помощью аддитивных и традиционных технологий. Рассмотрен вопрос какие технологии (традиционные или аддитивные) выгоднее использовать в условиях жесткого нормирования времени, выведена формула расчета экономической целесообразности применения аддитивных технологий.

ANALYSIS THE IMPACT OF THE TIME FACTOR ON THE EXPEDIENCE OF APPLICATION ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION PROCESS

Morshnev A.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: additive technologies, economic efficiency, economic effect, variable cost of time.

Abstract. In the article considered influence of the time factor on the assessment of the economic efficiency of production technologies. The technological process of obtaining the part using additive and traditional technologies is described. Considered the question which technologies (traditional or additive) are more profitable to use in conditions of strict time regulation, a formula for calculating the economic feasibility of using additive technologies is derived.

Как было рассмотрено в [1], при традиционном подходе расчет экономической эффективности проводится исходя из статических условий. Оцениваются необходимые затраты, экономический эффект, считается эффективность в виде отношения эффекта к затратам. При долгосрочном инвестировании и дисконтировании денежных потоков путем приведения настоящих расходов и будущих доходов к единой системе ценностей с учетом процента альтернативных предложений. Однако существуют класс производственных задач, при которых временная составляющая напрямую влияет на полученный эффект, объем затрат и, следовательно, на экономическую эффективность данного производственного проекта. Настоящий материал посвящен рассмотрению ряда задач подобного класса.

В качестве примера можно рассмотреть ситуацию ремонта крупного корабля, стоимость нахождения судна в сухом доке составляет довольно значительную сумму, кроме того, на имеющийся сухой док расписана очередь на ремонт других кораблей, поэтому срыв своевременного завершения ремонта чреват не только оплатой сверхнормативной оплатой простоя судна в сухом доке,

но и штрафами за срыв графика ремонта большого количества кораблей. Таким образом, задержка, вызванная несвоевременной поставкой/изготовлением детали на условно 1 рубль, может привести к убыткам на несколько сотен тысяч или миллионов рублей.

В качестве второго примера рассмотрим ситуацию с ремонта буровых установок. При бурении бур постоянно изнашивается и периодически нуждается в ремонте или замене. В связи с высокой ценой бурового и насосного оборудования, трубопроводных систем и тому подобных элементов инфраструктуры, простой бурового оборудования будет обходиться достаточно дорого. Снижение продолжительности времени ремонта буров позволит без дополнительных затрат увеличить резерв исправного оборудования, снизив тем самым вероятность длительного простоя оборудования. Стоит отметить, что стоимость собственно ремонта бура может быть достаточно большой, однако, по сравнению с потерями, которые могут возникнуть из-за простоя всей большой дорогостоящей системы, затраты на ремонт могут оказаться пренебрежимо малыми величинами.

Все эти примеры говорят о том, что в практических ситуациях изменение времени изготовления деталей может дать экономический эффект, многократно превышающий стоимость изготовленной детали. Таким образом, можно говорить, что рассматриваемый в настоящей статье класс задач имеет специфику расчета экономической эффективности, основные параметры которого рассмотрим ниже.

В качестве показателя, определяющего наличие затрат, связанных со временем, предполагается ввести коэффициент стоимости затраченного времени. При этом, стоит выделить величину, характеризующую экономический эффект, возникающий из-за: досрочного завершения, завершения в срок и сверхнормативного завершения проекта.

В некоторых случаях досрочное завершение некоего процесса может привести к экономическому эффекту (судно досрочно вышло из сухого дока и уменьшило платежи за аренду этого дока), а в некоторых случаях досрочное завершение некоего процесса может дать нулевой или отрицательный экономический эффект, в частности если досрочно выполняемая работа не лежит на критическом пути сетевого графика проведения ремонтных работ, то досрочное завершение одного из процессов не отразится на суммарной длительности всех работ.

Под завершением в срок стоит понимать стоимость времени при развитии событий в плановом порядке. Под сверхнормативным вариантом завершения процесса скрываются штрафы и санкции, вызванные задержкой завершения процесса по сравнению с планом.

$$\text{Затраты} = X_{нл} t_{нл} - X_{досроч} (t_{нл} - t_{факт}) + X_{сверх} (t_{факт} - t_{нл}), \quad (1)$$

$$\text{при } t_{нл} > t_{факт} \quad X_{сверх} = 0, \text{ при } t_{нл} < t_{факт} \quad X_{досроч} = 0,$$

где $X_{нл}$ – удельная величина скорости нарастания вмененных косвенных (общехозяйственных и общепроизводственных) расходов при плановом сроке завершения работ [руб./час]. Данная величина является вмененной, так как она обусловлена внешними факторами и находится вне зоны нашего контроля в рамках разрабатываемой модели.

$X_{досроч}$ – удельная величина скорости снижения расходов по сравнению с плановой при завершении работ досрочно [руб./час].

$X_{сверх}$ – удельная величина скорости нарастания дополнительных косвенных при задержке сроков выполнения работ относительно плановых [руб./час].

$t_{пл}$ – планируемое время завершения работ [час].

$t_{факт}$ – фактическое время завершения работ [час].

Численные значения коэффициентов определяются текущей экономической ситуацией.

Как можно было понять из рассмотренного ранее материала, экономико-математическая модель может иметь элементы, зависящие от времени, или может быть упрощена путем исключения время зависимых показателей в зависимости от экономической ситуации. Выше нами были рассмотрены два практических примера (ремонт в сухом доке и ремонт бура), в которых временной фактор влияет существенно на экономическую эффективность изучаемых аддитивных технологий. Структура введения показателей, зависящих от времени в этих двух примерах, будет иметь существенное различие, определяемое спецификой этих двух примеров.

Рассмотрим **пример первый**, с ремонтом корабля в сухом доке. Специфика задачи заключается в том, что существует жесткое ограничение по времени всего процесса, заключающегося в: демонтаже оборудования, проведении реверс-инжиниринга, производстве необходимых запчастей и проведении монтажа произведенных деталей в сборочную единицу, а затем сборочных единиц в изделие.

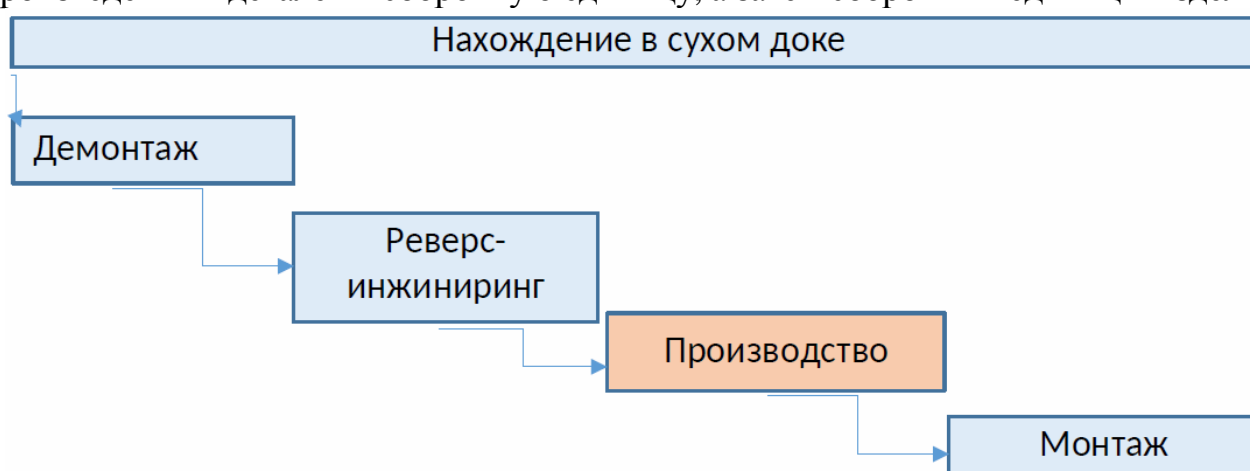


Рис. 1. Этапы реверс-инжиниринга

Проблема, рассматриваемая в настоящем примере, заключается в том, что приходится проводить ремонт изделия, произведенного длительное время назад, в том числе в другой стране, с возможной полной или частичной утерей конструкторской документации.

В рамках ремонта происходит демонтаж оборудования и разбор изделия до уровня деталей, с последующим проведением дефектации каждой детали. После определения дефектных деталей происходит процесс реверс-инжиниринга, в рамках которого, с помощью проведения сканирования и последующей обработки с помощью применения информационных технологий, восстанавливается 3D-модель детали, а на ее основе (при необходимости) конструкторская документация в электронном и бумажном виде.

На основании полученной 3D-модели организуется единичное производство детали, подлежащей замене в рамках ремонта. Именно этот процесс может быть реализован как с помощью аддитивных технологий (далее АТ) так и с помощью традиционных технологий (далее ТТ). Именно этот этап является различающимся и от оптимального выбора применяемых технологий на этом этапе будет зависеть экономическая эффективность всего процесса.

После этапа производства происходит монтаж деталей в сборочные единицы и сборочных единиц в изделие. Как и первые два этапа этот этап не зависит от применяемых технологий и таким образом не влияет на экономическую эффективность процесса.

Таким образом, для решения данной поставленной задачи необходимо определить с помощью какой технологии из полученной 3D-математической модели детали мы сумеем за жестко заданный срок произвести необходимый набор готовых деталей. Для этого необходимо определить время производства деталей с помощью АТ и ТТ с учетом основного $t_{осн}$ и вспомогательного $t_{всп}$ времени работы оборудования, а также время необходимое на внутреннюю логистику $t_{лог}$ в случае если операции выполняются не на одном рабочем месте. Предполагаем, что разработка программ для станков с ЧПУ (как для АТ так и ТТ) будет разработано на этапе реверс-инжиниринга и не будет входить в этап производства. Допускаем, что время разработки управляющих производственных программ для АТ и ТТ одинаковое. Для более четкого определения времен необходимо выбрать деталь и провести сравнения продолжительности изготовления с помощью различных технологий, очевидно, что сравнительная экономическая эффективность аддитивных технологий будет зависеть от технологичности той или иной детали.

Пример второй. Ремонт бурового оборудования. Постановка задачи: существует бур, представляющий из себя инструмент с режущей кромкой для прохождения различных пород грунта. В процессе работы режущая кромка стачивается, изнашивается и бур через некоторое время становится непригодным для работы. Отработанный бур направляется на восстановительный ремонт, который заключается в нанесении на изношенную режущую кромку специального восстанавливающего слоя заданного сплава металла. После осаждения металла на режущую кромку и, таким образом, наращивания на ней кромки металла происходит механическая обработка, предполагающая заточку и последующее упрочнение новой режущей кромки. Считается, что необходимо иметь несколько комплектов буров для обеспечения непрерывной работы буровой установки. Стоит отметить, что при нормальных условиях износ режущей кромки бура происходит в течение месяца, однако, при прохождении особо твердых пород бур может изнашиваться в более короткий срок. Для проведения восстановительного ремонта бур авиационным транспортом из района проведения работ (Сибирь, Крайний Север и др.) доставляется в Москву для проведения ремонта. Стоимость простоя оборудования, а также стоимость нового (невосстановленного) бура настолько велики, что окупают данную логистику (авиатранспорт) и восстановительный ремонт на достаточно дорогом оборудовании. В рамках данного примера, с помощью АТ решается задача

нанесения на режущую кромку нового слоя металла, обладающего высокой адгезией к предыдущим слоям.

В связи с тем, что величина платежей за срыв сроков изготовления изделий может на несколько порядков превышать стоимость изготовления детали, для моделирования динамической (с учетом времени выполнения) задачи будем считать равными производственные затраты изготовления деталей с помощью АТ и ТТ, сведя решение задачи только к определению фактора времени.

Подставив в формулу (1) значения для производственного цикла изготовления деталей с помощью АТ или ТТ можно получить величины затрат для каждого типа технологий и соответственно экономический эффект в виде разницы этих затрат. Таким образом, при принятых выше допущениях величина экономического эффекта будет зависеть от временного эффекта, то есть от разницы времен изготовления изделия с помощью ТТ и АТ. Как было отмечено ранее для примера сухого дока существенное различие во времени изготовления детали между АТ и ТТ появляется на этапе производства. Допустим, что контрольные операции для ТТ и АТ идентичны и соответственно временной эффект не добавляют.

Распишем подробно временные затраты для традиционного и аддитивного производства:

ТТ

1. Заготовительное производство: из стандартного профиля вырезать деталь для дальнейшей обработки (обработка резанием/давлением) (его длительность равна $t_{\text{заготовительное}}$).

2. Транспортировка заготовки из заготовительного цеха в цех основного производства (его длительность равна $t_{\text{логистическое1}}$).

3. Основное производство (на одном или нескольких станках, в случае применения нескольких станков добавляются затраты времени на снятие заготовки с одного станка, перемещение и установку заготовки в новый станок) (его длительность равна $t_{\text{ТТ}}$).

4. Транспортировка детали на участок финишной обработки (его длительность равна $t_{\text{логистическое2}}$).

5. Финишная обработка детали (включает в себя нанесение защитных и декоративных покрытий) (его длительность равна $t_{\text{финишное}}$).

6. Передача детали на этап сборки (его длительность равна $t_{\text{логистическое3}}$).

АТ

1. Подготовительный этап: выбор необходимого порошка и засыпка его в бункер (его длительность равна $t_{\text{подготовительное}}$).

2. Производственный этап: собственно процесс выращивания детали (его длительность равна $t_{\text{АТ}}$).

3. Перемещение детали в зону финишной обработки (его длительность равна $t_{\text{логистическое4}}$).

4. Финишная обработка детали (в том числе, удаление временных опор и поддержек, термообработка (ГИП), нанесение защитных и декоративных покрытий) (его длительность равна $t_{\text{финишноеАТ}}$).

5. Передача детали на этап сборки (его длительность равна $t_{\text{логистическое5}}$).

Проведем анализ каждой из введенной переменной, исходя из их физического и экономического смысла.

Можно предположить, что этапы транспортировки изделия из зоны основного производства в зону финишной обработки, а также из зоны финишной обработки в зону сборочного производства в общем случае для АТ и ТТ равны, т.е. $t_{логистическое2} = t_{логистическое4}$ и $t_{логистическое3} = t_{логистическое5}$. Величина данного времени зависит от размера партии, которая будет накапливаться для перемещения, а также от расстояния между соответствующими участками производства. В случае если партия минимальна (1 шт.) время перемещения зависит исключительно от расстояния.

Очевидно, что в случае если в рамках ТТ мы используем современный 3D-обрабатывающий центр, который позволяет обрабатывать одну заготовку без переустановок различными инструментами, то эффективность по времени зависит от разницы во времени между печатью детали с помощью АТ и суммой времени заготовительного производства, перемещения заготовки с заготовительного производства на основное, подготовительно-заключительное время на 3D-обрабатывающий центре (установка заготовки и извлечение готового изделия). В случае отсутствия 3D-обрабатывающего центра и выполнения каждой операции на отдельном станке время обработки с помощью ТТ составит:

$$t_{ТТ} = \sum_{i=1}^n (t_{машинное_i} + t_{подгот-заключ_i} + t_{логистики_i}). \quad (2)$$

Для того чтобы оценить величину $t_{АТ}$ необходимо объем детали разделить на скорость выращивания детали с помощью АТ.

$$t_{АТ} = V_{детали} / v_{выращ}, \quad (3)$$

где $V_{детали}$ – объем детали,

$v_{выращ}$ – скорость выращивания детали.

Таким образом, временной эффект ΔT можно представить в виде следующей формулы:

$$\Delta T = (t_{заготовительное} + t_{логистическое1} + t_{ТТ} + t_{логистическое2} + t_{финишное} + t_{логистическое3}) - (t_{подготовительное} + t_{АТ} + t_{логистическое4} + t_{финишноеАТ} + t_{логистическое5}). \quad (4)$$

Подставив формулы (2) и (3) в формулу (4) с учетом допущений по логистике получим:

$$\begin{aligned} \Delta T &= (t_{заготовительное} + t_{логистическое1} + \sum_{i=1}^n (t_{машинное_i} + t_{подгот-заключ_i} + t_{логистики_i}) + t_{финишное}) - (t_{подготовительное} + V_{детали} / v_{выращ} + t_{финишноеАТ}) \\ &= (t_{заготовительное} + t_{логистическое1} - t_{подготовительное}) + \sum_{i=1}^n (t_{машинное_i} + t_{подгот-заключ_i} + t_{логистики_i}) - V_{детали} / v_{выращ} + t_{финишное} - t_{финишноеАТ}. \end{aligned} \quad (5)$$

То есть, временной эффект ΔT зависит от трех составляющих.

– Временной эффект, возникающий на подготовительно-заготовительном этапе.

– Временной эффект, возникающий на этапе основного производства.

– Временной эффект, возникающий на этапе финишных работ.

Стоит отметить, что на подготовительно-заготовительном этапе очевидно, что ТТ продолжительнее чем АТ, то есть временной эффект положительный. На этапе основного производства временной эффект зависит от технологии традиционного производства и применения современных обрабатывающих центров, если при применении нескольких станков и наличия затрат времени на внутреннее перемещение очевидность положительного временного эффекта АТ, то при применении 3D-обрабатывающих центров однозначного ответа о наличии положительного временного эффекта нет. На этапе финишных работ в связи с тем, что для ТТ требуется только нанесение покрытий, а для АТ дополнительная механообработка в виде удаления поддержек и возможная дополнительная термообработка (ГИП), то очевидно, что временной эффект на этом этапе будет отрицательный.

Таким образом, можно сделать следующий вывод, что применение современных технологий (как современных 3D-обрабатывающих центров, так и аддитивных технологий) существенно сокращает время обработки детали, что создает существенное преимущество по сравнению с механообработкой на различных станках, что особо важно при высокой стоимости временных задержек. Таким образом, изложенная ранее схема проверки гипотез, определяющих тенденции развития аддитивных технологий [2] нуждается в коррекции, с учетом материала настоящей статьи. Для более подробного анализа временного эффекта при сравнении этих двух современных технологий между собой необходим более глубокий анализ с учетом специфики конкретного производства конкретной детали [3]: если конструкция детали предусматривает значительные пустоты и её вес имеет большое значение, то очевидна целесообразность АТ. Если деталь массивная, полости и пустоты в ней не предусмотрены, то целесообразнее ТТ, во всех остальных случаях целесообразно проводить конкретный анализ сравнительной эффективности технологий.

Список литературы

1. Малинин В.Л., Моршнева А.В., Тарасова И.И. О различных подходах к сравнению экономической эффективности современных технологий // Экономика и предпринимательство. 2017 № 12-3 (89). С. 1015-1018.
2. Малинин В.Л., Моршнева А.В., Тарасова И.И. Гипотезы, определяющие тенденции развития аддитивных технологий в современных российских условиях, и подходы к их проверке // Современная научная мысль. 2018 № 6 С. 252-258.
3. Малинин В.Л., Моршнева А.В., Тарасова И.И. О некоторых подходах к сегментации рынка оборудования для аддитивных технологий // Современная научная мысль. 2018. № 3. С.180-185.

Сведения об авторе:

Моршнева Александр Владимирович – заместитель директора Арктической дирекции, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва.