© Ю.А. Павлов, 2006

УДК 622:679.8

Ю.А. Павлов

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ГИБКИХ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ КАМНЕОБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

Компьютерно-интегрированное производство (КИП) или Computer Integrated Manufacturing (CIM) – это гибкое автоматизированное производство, в котором контроль над процессами осуществляется с помощью компьютерных систем обработки информации, человеко-машинного интерфейса и микропроцессорных систем числового программного управления (ЧПУ) технологическим оборудованием. В КИП единым информационным комплексом объединены все необходимые функциональные системы, обеспечивающие производственный процесс, начиная от анализа рынка и задания на проектирование конкурентоспособной продукции и заканчивая ее реализацией.

В структуре КИП выделяют следующие автоматизированные системы в соответствии с их функциональным назначением:

- гибкие производственные системы (ГПС), обеспечивающие выполнение переналаживаемых технологических процессов изготовления разнообразной продукции на имеющемся оборудовании;
- системы технической подготовки производства требуемой продукции, включая ее художественное, конструкторское проектирование и технологическую подготовку (САПР-АСТПП);
- системы оперативного управления технологическими процессами (АСУТП);
- системы управления предприятием (АСУП).

Целью создания КИП в конечном итоге является повышение производительности общественного труда на основе высокой эффективности всех перечисленных систем и получения дополнительного эффекта от их интеграции. Поэтому оценку эффективности КИП следует проводить на основе общей теории производительности технологических машин и труда обеспечивающих их функционирование работников [1, 2]. При этом необходимо анализировать всю систему разработки и постановки продукции на производство в целом.

Производительность труда зависит от двух факторов: суммарного объема выпуска продукции в течение определенного периода времени при условии фактической загрузки оборудования, т.е. от его производительности, и количества занятого в производственном процессе персонала. Первый из этих факторов определяется техническим уровнем оборудования, и, прежде всего, организационно-техническими характеристиками производственного процесса (коэффициентами сменности и загрузки оборудования).

Производительность автоматизированного дискретного производства определяется количеством изделий, выпускаемых в единицу времени (например, в год), с учетом фактического времени работы оборудования:

$$Q = \frac{T_0}{t_ц + \sum_i t_{i\,з}}, \qquad (1)$$

где T_0 - годовой фонд времени (8760 ч.); $t_ц$ - время цикла изготовления изделия, ч; $\sum_i t_i$ - суммарные внецикловые потери времени, приходящиеся на одно изделие, ч.

Общая теория производительности общественного труда заложена академиком В.А.Трапезниковым в его работах в области экономики научно-технического прогресса при переходе в конце 20 века от индустриального к информационному этапу развития человеческого общества. Производительность общественного труда находится по формуле:

$$A = B / (E_р + E_ж) = B / E_ж(K_т + 1), \qquad (2)$$

здесь B – объем выпускаемой продукции за расчетный период (например, год); $K_т$ – коэффициент технической вооруженности (или уровень механизации) труда, равный отношению $E_р / E_ж$, где $E_р$ и $E_ж$ - соответственно затраты прошлого и живого труда, в часах, которые реально оцениваются в отношении к приведенным к расчетному времени денежным единицам валовой продукции.

Между производительностью производственных процессов (Q) и производительностью труда (A) существуют сложные корреляционные связи. При этом средняя производительность труда в промышленности значительно (в 2–3 и более раз) отстает от прогресса в производственной сфере. В камнеобрабатывающем производстве России это отставание особенно заметно.

Обобщая теорию производительности труда на сферу подготовки производства, следует учитывать специфику проектных и управленческих работ. Наряду с автоматизацией при помощи компьютерных средств, в САПР-АСТПП используется традиционный метод повышения производительности за счет создания задела - библиотеки унифицированных (стандартных, типовых, блочных) конструкторско-техно-логических решений с последующим многократным их использованием в выпускаемой проектной продукции. В задел следует включить также разработку алгоритмов прикладных задач и программ проектирования и управления, по которым работают специалисты данной предметной области. Таким образом, в рамках системы разработки и постановки на производство продукции одного предприятия результат прошлого проектного труда частично реализуется в заделе проектных решений, а живой труд создает новую проектную продукцию. Затраты на приобретение компьютерных технических средств, пакетов базовых и прикладных программ возмещают прошлый труд других предприятий.

При такой трактовке основных понятий рост производительности общественного труда в сфере проектирования представляется формулой аналогичной приведенным в работах [1, 2] формулами для автоматизированных производств и отличающейся наличием индекса n (проектирование):

$$a_n = q_n (K_n+1) / (C_p K_n + e_n), \qquad (3)$$

где $q_n = B_{n2} / B_{n1}$ — рост выпуска проектной продукции, достигнутый за счет автоматизации (уровень B_{n2}), относительно исходного уровня (B_{n1}) с более низкой автоматизацией; $K_n = E_{p1}/E_{ж1}$ — коэффициент имеющейся технической вооруженности инженерного труда, равный отношению затрат прошлого ($E_р$) и живого ($E_ж$) труда в исходном варианте (см. формулу 2); $C_p = E_{p2} / E_{p1}$ — относительный рост единовременных затрат на задел и техническое оснащение автоматизированной системы; $e_n = E_{ж2} / E_{ж1}$ — относительное снижение затрат живого труда проектировщиков за счет эффекта от единовременных затрат на автоматизацию.

Эта формула может быть использована при анализе эффективности разных групп мероприятий по совершенствованию проектных работ, которые по содержанию аналогичны рассмотренным для сфер производства [2].

Первым таким мероприятием может стать повышение производительности труда проектировщиков (a_n) при использовании задела в виде библиотеки типовых решений, обеспечивая условие $C_p>1$. В этом случае принимается условие, что роста выпуска проектной документации не требуется, т.е. q_n= 1, а эффект автоматизации достигается только уменьшением количества проектировщиков: $e_n< 1$. Данные условия изменяют формулу (3), приводя ее к следующему виду:

$$a_n = (K_n+1) / (C_pK_n + e_n). \qquad (4)$$

При таком подходе даже значительное сокращение показателя $e_n\rightarrow 0$ дает ограниченный рост производительности, равный:

$$a_n = (K_n+1) / C_pK_n . \qquad (5)$$

Это приводит к тому, что при высоком насыщении проектной вычислительной техникой, т.е. при $K_n \rightarrow \infty$, $a_n = C_p^{-1}$, а с учетом того, что всегда $C_p>1$, значение $a_n<1$. Значит, такие мероприятия теряют перспективу в автоматизированных системах. Однако при неавтоматизированном проектировании, для которого характерно $C_p\rightarrow 0$, интенсификация проектной работы за счет использования справочников с типовыми решениями становится очень эффективной, т.к. в этом случае $a_n\rightarrow \infty$. В этом проявляется закономерность убывающей эффективности мероприятий, с помощью которых экономится только живой труд, в условиях повышения его технической вооруженности (например, при установке компьютера на рабочем месте проектировщика).

Другая группа мероприятий направлена на то, чтобы как можно более продлить сроки морального старения задела (базы данных) и используемых при проектировании программных средств САПР-АСТПП, например за счет их модульного построения из параметризованных элементов и дальнейшей модернизации, непрерывно увеличивая при этом объем выполняемых проектов и затраты живого труда (количество компьютеризированных рабочих мест). При этом $q_n >> 1$ при пропорционально растущих затратах труда $e_n = q_n$, а единовременные затраты на задел и техническое оснащение автоматизированной системы остаются постоянными, т.е. $C_p = 1$.

В этих условиях формула (2) приобретает такой вид:

$$a_n = q_n (K_n+1) / (K_n + q_n), \qquad (6)$$

Предельное значение производительности труда при длительном сроке использования системы достигает значения $a_n = K_n+1$ и ограничивается только параметром K_n. Поэтому при высокой технической вооруженности рабочих мест ($K_n > 1$) значение a_n может быть сколь угодно большим ($a_n\rightarrow \infty$). В ручном варианте выполнения проектных работ, когда $K_n =0$, эти мероприятия неэффективны, т.к. при этом $a_n = 1$. Таким образом, существует объективная закономерность возрастания эффективности мероприятий, при которых экономится прошлый труд при насыщении производства машинами, а служб его технической подготовки – компьютерами.

Следующая группа мероприятий направлена на увеличение производительности самих компьютеров и их программного обеспечения, вкладывая средства в оснащение рабочих мест проектантов ($C_p>1$). При этом общие затраты живого труда проектантов остаются неизменными ($e_n = 1$), а эффект автоматизации состоит в значительном росте количества выпущенных проектов ($q_n >> 1$) за счет повышения производительности компьютеров и совершенства его прикладного программного обеспечения ($K_n>1$).

Формула (3) для этого направления повышения эффективности САПР-АСТПП получает следующий вид:

$$a_n = q_n (K_n+1) / (C_pK_n + 1). \qquad (7)$$

При таком подходе возможен очень большой рост производительности труда в компьютерных системах КИП, т.к. он пропорционален росту разрабатываемых в них проектов.

Мероприятия всех рассмотренных групп следует оценивать по эффективности единовременных затрат C_p на их реализацию по условию $a_n > 1$ [2].

Затраты на мероприятия первой группы всегда менее значительные и оцениваются по формуле:

$$C_{p\,1} < (K_n + 1 - e_n) / K_n . \quad (8)$$

Наиболее велики единовременные затраты на новую компьютерную технику и ее программное обеспечение, находящиеся по формуле:

$$C_{p\,3} < [q_n(K_n + 1) - 1] / K_n . \quad (9)$$

При непрерывной модернизации системы, характерной для мероприятий второй группы, единовременные затраты для обеспечения эффективности остаются постоянными: $C_{p\,2} = 1$.

Для анализа эффективности КИП можно использовать результаты раздельного рассмотрения оценок эффективности гибких производственных систем и компьютерных систем проектирования изделий с технологической подготовкой их производства, а затем интегрировать эти оценки на основании методов теории производительности машин и труда.

Для этого разделяют затраты прошлого труда E_p на две составляющие: проектные (E_n) и производственные или цеховые ($E_ц$); значение прошлого труда находится из соотношения:

$$E_p = E_n + E_ц. \quad (10)$$

Затем, вводя это отношение в формулу (3) с учетом определения безразмерных единиц, получаем выражение для роста производительности общественного труда в гибком компьютерно-интегрированном производстве (индекс 2) по отношению к традиционному неавтоматизированному производству (индекс 1) в виде:

$$a = q\,(K_n + K_ц + 1)/(C_n K_n + C_ц K_ц + e), \quad (11)$$

где q – относительный рост выпуска продукции за расчетный период времени (например, год), характеризующий фактическую производительность КИП; $K_n = E_{n1} / E_{ж1}$ - коэффициент имеющейся технической вооруженности инженерного труда в исходном варианте, где $E_{ж1}$ – общие затраты живого труда (трудоемкость) неавтоматизированного производства; $K_ц = E_{ц1} / E_{ж1}$ – коэффициент имеющейся технической вооруженности труда производственных рабочих; $C_n = E_{n2} / E_{n1}$ - относительный рост единовременных затрат на оснащение автоматизированных рабочих мест инженерно-технических работников; $C_ц = E_{ц2} / E_{ц1}$ – относительный рост единовременных затрат на оснащение производственны рабочих мест автоматизированным технологическим оборудованием, в том числе с компьютерным управлением; $e = E_{ж2} / E_{ж1}$ — относительное снижение затрат живого труда всех работников предприятии за счет эффекта от единовременных затрат на автоматизацию, где $E_{ж2}$ - общая трудоемкость производства продукции в КИП.

Чтобы учесть дополнительный интеграционный эффект повышения производительности труда в КИП за счет рассмотренных в предыдущем параграфе факторов повышения его эффективности при использовании САПР-АСТПП, вводим эмпирические зависимости безразмерных параметров от увеличения единовременных затрат (C_n) на создание автоматизированных рабочих мест инженерно-технических работников [2].

Увеличение фактического объема выпускаемых изделий принимается пропорциональным возрастанию затрат на САПР-АСТПП: $q_ф = C_n q$. Снижение фактической стоимости технологического оснащения прямо зависит от этих затрат, т.е. $C_{цф} = C_ц / C_n$. Такая же зависимость принимается и по снижению фактической трудоемкости производства изделий: $e_ф = e / C_n$. Подставив эти соотношения в формулу (10), получим выражение для определения фактической роста производительности труда в КИП относительно неавтоматизированного производства при оптимизации проектных и организационно-техно-логических решений средствами САПР-АСТПП:

$a_ф = q\,(K_п + K_ц + 1)\,C_п^2 / (C_п^2 K_п +$

$+ C_ц K_ц + e).$ (12)

Если учесть, что в автоматизированном высокотехнологичном производстве обычно $K_п << K_ц$, то последнее выражение можно упростить:

$f_a = q\,(R_w + 1)\,C_g^2 \mid (C_w R_w + t)/$ (13)

Отсюда следует, что дополнительные затраты на оптимизацию проектов изделий и технологических процессов их изготовления за счет применения мощных САПР-АСТПП могут вызвать квадратичный рост фактической производительности труда в компьютерно-интегрированных производствах. Оптимизация должна проводиться по всем стадиям производственной фазы жизненного цикла изделий. Однако особое значение в системном плане приобретают технологические разработки, в результате которых достигаются следующие оптимальные производственные характеристики: трудовые, назначающие затраты живого труда; материальные, определяющие текущие затраты прошлого труда; фондообразующие, выражающие прошлый труд, затраченный на технологическое оснащение; организационно-технологические, регламентирующие маршрут прохождения изделием операций, участков, цехов. В связи с этим становятся обоснованными требования усиления влияния технологов на дизайнерские и конструкторские разработки новых изделий через технологический контроль проектов, а также на производственные процессы посредством определения организационных форм реализации технологических маршрутов изготовления этих изделий. Все эти требования выполняются в интегрированных компьютерных системах САПР-АСТПП, реализующих технические задачи КИП.

Эффективность производства определяется отношением роста производительности труда к требуемым для этого затратам прошлого труда, овеществленного в средствах производства. В безразмерном виде формула эффективности от внедрения КИП в сравнении с неавтоматизированным производством имеет следующий вид:

$Э = a_ф / C_р$. (14)

Для выяснения характера зависимости составляющих эффекта повышения производительности труда $a_ф$ от единовременных приведенных затрат $C_п$ необходимо сравнить два вида такой зависимости — линейную и квадратичную. Первую характеризуют формулы (12) и (13), введение которых в (3) позволяет определить эффективность КИП в сравнении с не интегрированным производством, имеющим тот же уровень автоматизации гибкой производственной системы, т.е. при $C_ц K_ц \to 0$:

$Э_л = q\,(K_ц + 1)\,C_п / (C_п^2 K_п + e).$ (15)

Вторую зависимость характеризуют следующие квадратичные соотношения: $q_ф = C_п^2 q$ и $e_ф = e / C_п^2$; тогда при тех же условиях:

$Э_к = q\,(K_ц + 1)\,C_п^3 / (C_п^3 K_п + e).$ (16)

Нарастающий итог относительных затрат на создание интегрированных компьютерных систем можно представить как стремление их к бесконечности, т. е. $C_п \to \infty$. Тогда предельная эффективность определяется зависимостями:

$Э_л \to 0$; $Э_к \to q\,(K_ц + 1)/K_п$.

Отсюда следует, что постоянная предельная эффективность КИП обеспечивается квадратичным ростом эффекта по отдельным составляющим роста производительности труда от увеличения затрат, а линейная зависимость допустима лишь на малом уровне затрат, имеющем место на начальных этапах разработки (рисунок).

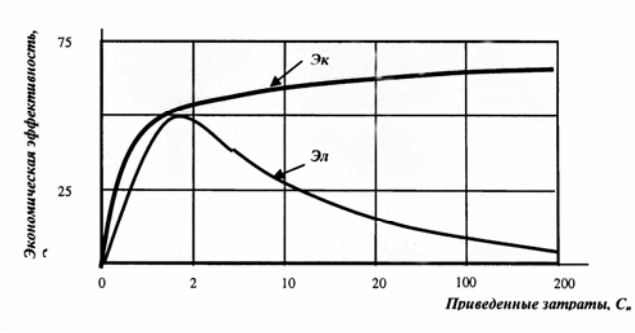

Рис. 1. Эффективность КИП при увеличении начальных затрат с разным эффектом их использования

Сроки освоения компьютерных систем также являются важным фактором роста эффективности КИП. Их влияние можно выявить, если в основную формулу (2) производительности труда A ввести время, представив количество продукции и живой труд в виде:

$$B = QT;\ E_{ж} = E_{г}T, \qquad (17)$$

где Q, $E_г$ — годовые производительность КИП и затраты труда; T — продолжительность использования компьютерных систем, год.

Сравним два варианта внедрения компьютерных средств: вариант с индексом 1 имеет большую производительность A_1, но внедряется медленно в течение T_0 лет, а с индексом 2 — меньшую производительность A_2, но используется без задержки. Формула достигаемой относительной производительности труда для этих вариантов компьютеризации имеют следующий вид:

$$a = \frac{A_1}{A_2} = \frac{Q_1(T - T_0)(E_{p2} + E_{г2}T)}{Q_2T[E_{p1} + E_{г1}(T - T_0)]}, \qquad (18)$$

где E_{p1} и E_{p2} – затраты прошлого труда на оснащение производства соответственно для варианта 1 и 2.

При задержке внедрения варианта 1, равной сроку использования ($T_0=T$), получаем $a = 0$. Это означает, что пренебрежение быстро внедряемым вари-антом 2 привело в пределе к пустой трате средств. Оценку допустимой степени снижения производительности производства (q) для быстро внедряемого упрощенного варианта компьютерной системы можно найти из условия его эффективности, т.е. при $a > 1$, в виде соотношения:

$$q = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{(T - T_0)(E_{p2} + E_{г2}T)}{T[E_{p1} + E_{г1}(T - T_0)]} \geq [q]. \qquad (19)$$

Обычно $E_{p2} << E_{p1}$, а $E_{г2} > E_{г1}$, поэтому при большом значении времени (T) использования компьютерных систем можно принять [2]: $E_{p2} + E_{г2}T \approx E_{p1} + E_{г1}(T - T_0)$. В этом случае формула для оценки вариантов внедрения компьютерных систем упрощается: $Q_2 = Q_1(1 - T_0/T)$, т.е. при $T_0 \to 0$ потери производительности не произойдет даже при использовании менее эффективных разработок.

Отсюда следует вывод, что планирование сложных разработок САПР-АСТПП целесообразно вести по этапам, завершаемым быстрым внедрением системы по частям.

Рассмотренная методика позволяет на ранних стадиях разработки определить достигаемую экономическую эффективность КИП, или обосновать стратегию внедрения компьютерных систем проектирования и технологической подготовки производства на действующем камнеобрабатывающем предприятии.

Определение суммарного экономического эффекта от использования концепции КИП в камнеобрабатывающей отрасли представляет собой достаточно сложную динамическую задачу. Сравнительно высокий уровень эффективности, достигнутый при модернизации наиболее крупных камнеобрабатывающих производств, обычно предполагает возрастание среднего уровня эффективности работы не только всех производств данной компании, но и других взаимосвязанных с ним предпри-

ятий отрасли. Таким образом, каждое новое высокоэффективное средство компьютерно-интегрированного производства, например, объектно-ориентированная САПР-АСТПП, долж-ны обладать свойством широкой распространяемости в среде других взаимосвязанных производств.

Степень распространения $F(t)$ показывает, какова доля использования новации $R_n(t)$ в момент времени t по отношению к возможному объему (R^*) ее применения на данном предприятии, комбинате или в отрасли:

$$F(t) = \frac{R_n(t)}{R^*}, \qquad (20)$$

здесь величина R^*, называемая также удельным потенциалом экономии, определяет общее количество рабочих мест, где может быть использована данная новация. Обычно значение R^* находится на основании экспертных оценок так называемого коэффициента удельного потенциала экономии k, который характеризует процент рабочих мест на предприятиях комбината или отрасли, которые могут быть охвачены данной новацией.

Формула (20) математически преобразуется в степень диффузии:

$$D(t) = \frac{F(t)}{1 - F(t)}. \qquad (21)$$

Если выразить графически логарифмическую степень диффузии во времени: $lnD(t)$, то для большинства новаций получается прямая линия. Можно поэтому предположить, что:

$$lnD(t) = \alpha + \beta_t. \qquad (22)$$

При этом скорость распространения новации составит:

$$V(t) = \frac{R_n'(t)}{R_n(t)} = \beta_t[1 - F(t)]. \qquad (23)$$

Из последнего выражения следует, что процессы распространения новаций можно изобразить с помощью так называемой "логистической" (S-образной) функции насыщения.

Таким образом, основная формула средней эффективности трудовых затрат при внедрении в производство инновационных проектов и распространении их на предприятиях компании или отрасли может быть записана следующим образом:

$$e_r = \frac{\Delta E_e}{E_0} = \frac{kF(t)}{[\frac{1}{q(t)} - 1]}, \qquad (24)$$

где $\Delta E_г$ – снижение затрат труда в часах на единицу стоимости валовой продукции за плановый год в сравнении с базовым годом; E_0 – затраты труда в часах на единицу стоимости валовой продукции в базовом году (с индексом 0); k – коэффициент удельного потенциала экономии (экспертная оценка); $F(t)$ – степень распространения новации в плановом году; $q(t)$ – относительный рост производительности, обеспечиваемый внедрением новации в производство в плановом году по сравнению с исходным годом.

Итак, средняя динамическая эффективность какого–либо нововведения (например, компьютерной систе-мы автоматизации) зависит не только от вызванного им повышения производительности выпуска продукции, но и экономической потребности и масштабов внедрения данного новшества в плановом году на предприятиях компании или отрасли.

Приведенные показатели эффективности функционирования КИП и рассмотренные методы их оценки используются при разработке методологии создания компьютерных систем автоматизированного проектирования и подготовки производства промыш-ленных изделий из природного камня [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев В.Н., Садовская Т.Г.* Организационно-экономические основы гибкого производства. - М.: Высшая школа, 1988. - 271 с.

2. *Логашев В.Г.* Технологические основы гибких автоматических производств. – Л.: Машиностроение, 1985. – 176 с.

3. *Павлов Ю.А.* Интегрированная компьютерная система проектирования и подготовки производства декоративно-художественных и ювелирных изделий из цветного камня. // ГИАБ, №5. - М.: Изд-во МГГУ, 2005, с. 273-279

Коротко об авторах

Павлов Ю.А. – профессор, кафедра «Технология художественной обработки материалов», Московский государственный горный университет.

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ			
АГАПОВ Андрей Александрович	Эколого-экономическая оценка эффективности функционирования центров мониторинга окружающей среды в районах ликвидации шахт	08.00.05	к.э.н.
БЕЛОВ Михаил Алексеевич	Обоснование и разработка метода определения параметров зернистой структуры и пористости горных пород на основе принципов ультразвуковой спектроскопии	25.00.20	к.т.н.
ГНЕВАШЕВ Роман Иванович	Эколого-экономическая оценка функционирования линейно-производственных станций в системе нефтепродуктов	08.00.05	к.э.н.
КАРПОВ Алексей Викторович	Повышение технологичности крепления и эксплуатационной надежности подготовительных выработок при интенсивной отработке запасов угля	28.00.22	к.т.н.
КОЛОМНИКОВ Сергей Семенович	Разработка методов и средств интенсификации циклично-поточной технологии открытой разработки сложноструктурных месторождений	25.00.22	к.т.н.