

УДК 338.984:519.863

## **Модели и инструментальные средства оценки эффективности производственной деятельности промышленного предприятия от использования цифровых технологий и производств**

**д.т.н., профессор Лукина С.В.<sup>1</sup>, Макаров В.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г.Москва, Россия, email: [lukina\\_sv@mail.ru](mailto:lukina_sv@mail.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва, Россия, email: [mmvv\\_mm@mail.ru](mailto:mmvv_mm@mail.ru)

### **Аннотация**

В статье разработана методика оценки эффективности производственной деятельности промышленного предприятия от использования цифровых технологий и производств. Методика позволяет оценить и сравнить все множество допустимых альтернативных вариантов инновационных решений по внедрению цифровых технологий и производств на этапах жизненного цикла продукции и развития производства.

Основу методики составляет комплекс математических моделей формирования средств оснащения производственных процессов элементами цифровых технологий; формирования совокупности частных критериев оценки эффективности производственной деятельности предприятия в результате внедрения цифровых технологий; поиска оптимального варианта решения задачи.

Разработанная методика автоматизирована с использованием инструментальных средств MS Excel, MS Access, MS Project. Промышленная апробация методики показала ее работоспособность при решении задач сравнительной оценки вариантов инновационных решений по внедрению цифровых технологий на промышленном предприятии.

**Ключевые слова:** инновационное решение, цифровые технологии и производства, эффективность, оптимизация

### **1. Введение**

В настоящее время уровень технического и технологического развития предприятий, их конкурентоспособность в значительной степени определяется степенью автоматизации и информационно-коммуникационной оснащенности производственных процессов, обоснованных использованием цифровых технологий и производств (ЦИПР). Анализ различных подходов, используемых компаниями для повышения эффективности производства, показывает, что достичь существенных улучшений результатов деятельности можно путем перехода к цифровому производству.

Ключевыми особенностями такого вида производства является всесторонний обмен информацией между всеми стадиями процесса организованный исключительно в цифровом виде. Сложность задачи производственного управления в этом случае определяется необходимостью выявления и установления большого количества сложных взаимосвязей между параметрами производственных процессов, средств технологического оснащения технологических операций и параметрами оценки эффективности производственной деятельности промышленных предприятий с учетом динамически изменяющихся факторов внешней и внутренней среды предприятия. Центральной задачей при этом является процедура синтеза вариантов решения проблемы с последующей оценкой альтернатив по выбранным критериям эффективности с учетом принятых ограничений.

Целью проведения мероприятий по внедрению на промышленных предприятиях технологий цифрового производства является повышение экономической эффективности работы предприятий и качества продукции, сокращение сроков создания и запуска в производство новых образцов выпускаемой продукции, оптимизация использования имеющихся ресурсов предприятий, мобилизационных резервов производственных мощностей, обеспечение конкурентоспособности продукции на мировых рынках.

Однако, по данным доступных литературных источников в настоящее время соотношение затрат и эффективности цифровизации низко, имеет большие сроки окупаемости и высокие риски информационной безопасности процессов [1-5, 8]. В этой связи актуальной является задача моделирования процесса принятия решения при оснащении производственных процессов компонентами цифровых производств и технологий.

## **2. Методика оценки эффективности производственной деятельности промышленного предприятия от использования цифровых технологий и производств**

Средства реализации цифрового производства базируются на цифровых информационных технологиях [7]. Их основными составляющими являются аппаратная и программная. Аппаратная составляющая это - производственное оборудование различного целевого назначения, например станки, промышленные роботы, 3D-принтеры и т. п.; компьютеры и оргтехника. Программная составляющая это - комплексы программного обеспечения, реализующие алгоритмы формирования и управления всеми информационными потоками и процессами проектирования и производства, а также процессами создания, передачи и хранения создаваемой информации и т.п.

Программа развития предприятия должна определять концепцию технической, кадровой, структурной и экономической политики, решать задачи долгосрочного характера в сфере цифровизации, в том числе выбора технико-экономических решений и средств для построения информационной

системы предприятия. Разработка программы развития ЦИПР должна опираться на реальную оценку производственного потенциала, которым располагает предприятие, включая как внутренние факторы (возможности финансирования мероприятий по цифровизации бизнес – процессов, уровень компьютерной грамотности специалистов предприятия, техническая база, готовность руководства и пр.), так и внешние факторы (уровень цифровизации процессов взаимодействия с партнерами, наличие ИТ-компаний и ИТ-специалистов в регионе и т.п.).

Внедрение средств реализации цифровых технологий оказывает различное влияние на показатели деятельности предприятия. Экономический эффект от внедрения ЦИПР следует разделять на прямой и косвенный. Под прямым экономическим эффектом следует понимать экономию материально-трудовых ресурсов и повышение уровня качества выпускаемой продукции, полученные от оптимизации производственной деятельности предприятия. Косвенный экономический эффект достигается оптимизацией внепроизводственной деятельности предприятия, определяющей сокращение затрат на функции управления предприятием. В рамках данной работы рассматривается моделирование и исследование прямого экономического эффекта.

В общем случае программа внедрения цифровых технологий и производств на предприятии должна представлять собой систему научно обоснованных и целевых ориентиров, содержать определение основных направлений и параметров развития [9]:

-систем и средств цифровизации процессов по всему жизненному циклу выпускаемой продукции (проектирование, технологическая подготовка производства, планирование и управление производством, снабжение, сбыт, обслуживание и пр.) (множество  $v_1 = \{v_{11}, \dots, v_{1n}\}$ );

-электронного управления документооборотом и ресурсами предприятия (трудовыми, материальными и финансовыми) (множество  $v_2 = \{v_{21}, \dots, v_{2n}\}$ );

-цифрового управления предприятием и, в частности, производством изделий в виде «цифровых фабрик» (множество  $v_3 = \{v_{31}, \dots, v_{3n}\}$ );

-интегрированной информационной системы (ИИС) предприятия, работающей в режиме реального времени и объединяющей все имеющиеся и планируемые к освоению системы автоматизации (множество  $v_4 = \{v_{41}, \dots, v_{4n}\}$ );

-систем управления проектной и мультипроектной средой, средств (технических, интеллектуальных), необходимых для достижения поставленных целей, а также организационно-технических мер, обеспечивающих благоприятную среду функционирования ИИС (множество  $v_5 = \{v_{51}, \dots, v_{5n}\}$ ).

Тогда множество возможных вариантов комплектования ЦИПР, участвующих в производственной деятельности предприятия, следует определять по выражению (3), а множество вариантных исполнений ЦИПР – по выражению (4):

$$\Phi_i = D_s \cdot i = 1 \cdot 5 \cdot j = 1 \cdot m \cdot v_{ij} \cdot C_t \cdot i, \quad (1)$$

$$M_{\phi_i} = D_s \cdot C_t \prod_{i=1}^5 \prod_{i=1}^m v_{ij}. \quad (2)$$

Здесь  $D_s$ ,  $C_t$  - исходная информация и критерий выбора оптимального варианта инновационного решения, соответственно.

В рамках действующего предприятия, выбор эффективного инновационного решения, обоснованного внедрением ЦИПР, следует осуществлять на основе анализа совокупности производственных и финансовых показателей. В группе производственных показателей следует определять объем товарного производства продукции  $Q_t$  в натуральном выражении, являющийся функцией количества имеющегося в распоряжении оборудования  $a$ , технически обоснованной нормы производительности оборудования, выраженной в конечном продукте  $H$  и коэффициента загрузки оборудования  $K_{30}$ :

$$Q_t = f(a, H, K_{30}) \rightarrow \max \quad (3)$$

В случае равенства объема товарного производства, существующего при фиксированном госзаказе, величина  $Q_t$  является функцией суммарной производственной мощности  $M_{np}$  и коэффициента загрузки оборудования:

$$Q_t = f(M_{np}, K_{30}) \rightarrow \max \quad (4)$$

Мерой максимального объема выпуска продукции соответствующего качества и ассортимента в натуральном выражении является производственная мощность предприятия:

$$M_{np} = \sum_{j=1}^J a_j H_j T_{эфj}, \quad (5)$$

где  $a_j$  - количество однотипных аппаратов, машин, агрегатов;  $H_j$  - технически обоснованная норма производительности оборудования (для строящихся предприятий – норма производительности по паспорту завода-изготовителя), выраженная в конечном продукте;  $T_{эфj}$  - эффективный фонд времени работы оборудования, час;  $J$  - совокупность типов имеющегося оборудования/

$$\text{Объем привлекаемого оборудования в натуральном выражении } A = \sum_{j=1}^J a_j$$

для каждого варианта определяется на этапе формирования инновационных альтернатив.

В общем случае при прочих равных условиях, критерий максимально допустимого объема производимой продукции в натуральном выражении может быть охарактеризован системой:

$$\{a \rightarrow \max, H \rightarrow \max, K_{30} \rightarrow \max, M_{np} \rightarrow \max \quad (6)$$

Величина получаемой чистой продукции, включая амортизацию:  
 $ЧП(A) = ТП - М \rightarrow \max,$

(7)

где  $ТП$  - объем производимой за счет применения инноваций продукции в стоимостном выражении в расчете на год, руб.;  $М$  - материальные затраты на производство продукции в расчете на год, руб.

Максимизация критерия будет определяться системой:

$$i \quad (8)$$

Максимум объема производимой продукции в стоимостном выражении определяется максимальным объемом производимой продукции в натуральном выражении  $Q_t$  и максимальной отпускной ценой единицы продукции  $C$ . Условием будет являться ограничение отпускной цены изделия пороговой величиной  $[C]_{max}$  - максимальной ценой, при которой рынок согласится принять изделие в требуемом для предприятия объеме:

$$C \leq [C]_{max} \quad (9)$$

Величина материальных затрат на весь объем продукции определяются объемом производимой продукции  $Q_t$  и величиной материальных затрат на единицу продукции  $c_v$ .

Величина годового дохода может быть определена разницей объема получаемой чистой продукции в стоимостном выражении и объемом затрат материальной  $M$  и нематериальной сфер  $Z$  на весь объем продукции:

$$D(A) = TP - M - Z \rightarrow \max \quad (10)$$

В группе критериев, характеризующих финансовые результаты инновационного решения, следует определять величину чистого дохода, получаемого предприятием:

$$D_u = D - H_n - P_k \rightarrow \max \quad (11)$$

где  $D$  - доход, получаемый за счет реализации инновационного решения;  $H_n$  - общая сумма налогов, уплаченных в бюджет и во внебюджетные фонды в части, относящейся к реализации инновационного решения;  $P_k$  - общая величина сумм, оплачиваемых по кредитным обязательствам.

Показатель может рассчитываться по каждому рассматриваемому периоду и за весь срок реализации решения. Максимизация показателя определяется системой условий:

$$\{ D \rightarrow \max, H_n \rightarrow \min, P_k \rightarrow \min \} \quad (12)$$

Критерий, характеризующий оптимальное решение по величине чистой прибыли, может быть сформулирован как:

$$P_u = P - H_n - P_k \rightarrow \max \quad (13)$$

Здесь  $P$  - величина прибыли до налогообложения (ЕВТ), получаемая за счет реализации инновационного решения.

Критерии, характеризующие величину коэффициентов валового дохода, операционной прибыли и чистой прибыли, могут быть записаны как:

$$K_n = D / ЧП \rightarrow \max, K_{on} = P / ЧП \rightarrow \max, K_{un} = P_u / ЧП \rightarrow \max \quad (14)$$

Оптимальное решение по критериям (16) характеризуется максимальной величиной получаемого за счет реализации дохода, операционной прибыли или чистой прибыли при минимальной величине стоимостного объема производимой продукции. Критерий, характеризующий решение по величине коэффициента оборачиваемости активов, записывается как:

$$K_a = \frac{2 \text{ ЧП}}{A_{н2} - A_{к2}} \rightarrow \max \quad (15)$$

где  $A_{нз}$ ,  $A_{кз}$  - соответственно, активы предприятия на начало и на конец года.

Оптимальным по этому показателю будет решения, характеризующееся максимальной величиной объема продукции при минимальной стоимостной оценке активов:

$$\{ ЧП \rightarrow \max, A_{нз} - A_{кз} \rightarrow \min \quad (16)$$

Критерии, характеризующие оптимальное решение с точки зрения рентабельности продукции по доходу  $P_d$ , операционной прибыли  $\Pi$  и чистой прибыли  $\Pi_c$  могут быть записаны как:

$$P_d = D / PP \rightarrow \max, P_n = \Pi / PP \rightarrow \max, P_{\Pi_c} = \Pi_c / PP \rightarrow \max, \quad (17)$$

где  $PP$  - объем продаж продукции, произведенной при реализации инновационного решения.

Значения показателей рентабельности целесообразно рассчитывать как отдельно по каждому году периода реализации инновационного решения (создания, разработки и эксплуатации), так и целиком за весь период. Оптимальное по критериям рентабельности продукции решение будет характеризоваться системой условий:

$$\{ D \rightarrow \max, \Pi \rightarrow \max, \Pi_c \rightarrow \max, PP \rightarrow \min \quad (18)$$

Оценка инновационного решения по инвестиционной составляющей позволит оценить перспективность будущих вложений в его реализацию. Критерий, характеризующий инновационное решение, обоснованное внедрением ЦИПР, с позиции приносимой им величины чистого дисконтированного денежного потока от операционной деятельности  $ЧДП_o$  в определенном периоде, формулируется как:

$$ЧД П_o = \frac{ПОД - ОДС}{(1+r)} \rightarrow \max, \quad (19)$$

где  $ПОД$  - приток денежных средств за счет операционной деятельности;  $ОДС$  - отток денежных средств за счет операционной деятельности;  $r$  - ставка дисконтирования.

Максимизация показателя может быть описана системой:

$$\{ ПОД \rightarrow \max, ОДС \rightarrow \min, r \rightarrow \min \quad (20)$$

Критерий, характеризующий величину индекса рентабельности инвестиций, может быть записан как:

$$ИР = i \quad (21)$$

Критерий, определяющий оптимальное решение по величине внутренней нормы рентабельности, записывается как:

$$\sum_{t=1}^n \frac{ЧД П_o}{i^t} = 0 \quad (22)$$

Оптимальным будет являться решение с минимальной внутренней нормой доходности:

$$ВНД \rightarrow \min \quad (23)$$

Для решений, предусматривающих реинвестирование части прибыли в ходе выполнения проекта по реализации решения, необходимо использовать критерий, характеризующий величину модифицированной внутренней нормы доходности  $МВНД$  :

$$\sum_{t=0}^n \frac{K_3}{i^t} i, \quad (24)$$

где  $d$  - уровень реинвестиций.

Оптимальным будет решение, характеризующее условием:

$$МВНД \rightarrow \min \quad (25)$$

Критерий, характеризующий период окупаемости инвестиций, может быть записан как

$$T_n = \frac{K_3}{\sum_{i=1}^n \frac{Д П_{oi}}{t}} \rightarrow \min \quad (26)$$

где  $t$ - период реализации решения.

В общем виде математическая модель задачи поиска оптимального варианта оснащения производственных процессов предприятия элементами ЦИПР, сформированная с учетом (1) и (2), имеет вид:

$$\Phi_{ad} = \sum_{i=1}^h \Phi_i K_{3n_i} \rightarrow \min \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^m v_{ij} = 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ \sum_{i=1}^n v_{ij} = 1, \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\} \\ v_{ij} \in \{0, 1\}, \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}) \end{array} \right.$$

Здесь  $\sum_{i=1}^h \Phi_i K_{3n_i}$ - аддитивная свертка критериев предпочтения  $\Phi_i$  (3)-(26);

$K_{3n_i}$ - коэффициент значимости  $i$ -го критерия предпочтения;  $h$  – общее количество критериев предпочтения.  $K_{3n_i}$  может принимать значения не только из диапазона  $0 \div 1$ . В качестве  $K_{3n_i}$  могут быть приняты индивидуальные веса частных критериев, свойств или составляющих ЦИПР. Например,  $K_{3n_i}$  может быть переводным коэффициентом в единую систему измерения, или может быть использован для перевода качественного критерия в количественный.

### 3 Реализация методики

При практической реализации разработанной методики, моделей и алгоритма использовался функционал программных продуктов MS Excel, MS Access, MS Project.

Выбор Microsoft Excel в качестве одного из инструментов обоснован наличием встроенных функций и алгоритмов поиска решения, высокой доступностью и наглядностью приложения. MS Access использован в качестве основного инструмента для формирования баз данных справочной и нормативной информации по показателям проекта. MS Project использован в качестве основного инструмента календарного планирования проекта, отслеживания графиков выполнения и расчета экономических показателей инновационного проекта.

Разработанные модели и инструментальные средства были применены для оценки эффективности производственной деятельности промышленного предприятия реального сектора экономики. Рассматривался процесс технической подготовки производства проекта внедрения робототехнического комплекса лазерной резки [6].

Процесс технической подготовки производства был разбит на несколько этапов: формирование 3D-геометрического образа изделия, выбор способа и технологии резки, технического перевооружения и оценки эффективности производственной деятельности производственного участка от внедрения ЦИПР. Расчетный план-график инновационного проекта внедрения ЦИПР и средств технологического перевооружения производственного участка составил 2,8 года.

Для оптимизации параметров инновационного решения, обоснованного внедрением ЦИПР, использовалось имитационное моделирование производственной деятельности предприятия по математической модели (32), предусматривающее как наглядное в виде графиков, так и табличное представление изменений во времени выделенных критериев оценки. Результатом имитационного моделирования явился выбор технических, технологических и организационных параметров инновационного проекта внедрения ЦИПР, обеспечивающих следующие показатели эффективности производственной деятельности предприятия:

- срок окупаемости инвестиций 1,5 года при общей длительности проекта 2,8 года;
- среднюю норму рентабельности  $ARR=110,49\%$ ;
- внутреннюю норму рентабельности  $IRR=96,19\%$ ;
- модифицированную внутреннюю норму рентабельности  $MIRR=49,86\%$ ;
- индекс прибыльности  $PI = 2,03$ ,
- чистый приведенный доход  $NPV = 1\ 680\ 857$  долларов США.

#### 4. Выводы

В результате проведенных исследований сформирована методика оценки эффективности производственной деятельности промышленного предприятия от использования цифровых технологий и производств.

Основу методики составляет комплекс математических моделей формирования средств оснащения производственных процессов элементами ЦИПР; формирования совокупности частных критериев оценки эффективности производственной деятельности предприятия в результате внедрения ЦИПР; поиска оптимального варианта решения задачи.

Промышленная апробация методики показала ее работоспособность при решении производственных задач, связанных с внедрением ЦИПР на различных этапах жизненного цикла изделий и производств.

Дальнейшее развитие методики предполагает оценку эффективности производственной деятельности промышленного предприятия от внедрения ЦИПР в рамках отрасли народного хозяйства.



## Список литературы

1. Андреев В.Н., Коршунова Е.Д., Волкова Г.Д., Лукина С.В., Алиев В.Р. Четвертая Промышленная революция и цифровая трансформация: технологический суверенный контроль // Российский экономический интернет-журнал. 2022. № 3.
2. Коршунова Е.Д., Сварник П.Н. Бизнес-модель предприятий при цифровой трансформации промышленности // Цифровая экономика: оборудование, управление, человеческий капитал. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Вологда, 2017. Издательство: ООО "Маркер". С. 36-38.
3. Кутин А.А., Седых М.И., Ивашин С.С. Цифровая трансформация производственных систем в машиностроении // Автоматизация и управление в машиностроении. 2018. № 2 (31). С. 28-35
4. Лукина С.В. Методика оценки эффективности цифровой трансформации производства в условиях многоукладности промышленности // В сборнике: Машиностроение: традиции и инновации (МТИ - 2020). Материалы XIII всероссийской конференции с международным участием. Москва, 2020. С. 228-234.
5. Лукина С.В., Коршунова Е.Д., Макаров В.В. Методика формирования и Выбор программы цифровой трансформации промышленного предприятия // Социальные и экономические системы. 2022. № 4 (28). С. 317-326.
6. Лукина С.В., Кудрявцева А.Л., Манаенков И.В. Технологический синтез многоосевого станка для лазерной обработки // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 1 (79). С. 36-40.
7. Макаров В.М., Лукина С.В. Станочный парк цифрового производства // РИТМ машиностроения. 2019. № 9. С. 42.
8. Batova M., Baranov V., Mayorov S. Automation of economic activity management of high-tech structures of innovation-oriented clusters // Journal of Industrial Integration and Management: Innovation and Entrepreneurship. 2021. Т. 6. № 1. pp. 15-30
9. Lukina S., Korshunova E., Zimovets O., Dorozhkina O., Makarov V. Models and software tools for assessing efficiency of industrial company production activity in connection with digital technology and manufacturing use // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. № 459(6). p. 062021.