УДК 621.81:658.562

А. Н. Трусов

МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Автоматизация научного и инженерного труда способствует интенсификации общественного производства и повышению его эффективности, ускорению темпов научно-технического прогресса. Достижения науки и техники закономерно усложнили производство и обусловили поиск новых путей в деле совершенствования его организации и управления, предопределили появление новой технической базы управления и прежде всего электронно-вычислительной техники.

Прирост эффективности экономической деятельности предприятия в результате комплексной автоматизации системы подготовки производства может проявляться различным образом. В качестве возможных факторов, определяющих совокупный эффект от автоматизации, часто рассматриваются следующие составляющие:

1. Качественное улучшение процессов подготовки и принятия решений.

2. Уменьшение трудоемкости процессов обработки и использования данных.

3. Экономия условно-постоянных расходов за счет возможного сокращения административно-управленческого персонала, необходимого для обеспечения процесса управления предприятием.

4. Переориентация персонала, высвобожденного от рутинных задач обработки данных, на более интеллектуальные виды деятельности.

5. Стандартизация проектных процедур во всех подразделениях предприятия.

6. Оптимизация производственной программы предприятия.

7. Сокращение сроков оборачиваемости оборотных средств.

8. Установление оптимального уровня запасов материальных ресурсов и объемов незавершенного производства.

9. Уменьшение зависимости от конкретных физических лиц, являющихся «держателями» информации или технологий обработки данных.

10. Использование незаметных (скрытых) для исполнителей технологий контроля выполняемой ими работы, не требующих предоставления справок и отчетов к определенной дате.

При производстве изделий приходится решать сложный комплекс конструкторских, технологических и организационных задач.

Автоматизированная система проектирования должна учитывать следующие основные принципы: блочно-модульный, принцип информационного единства, совместимость всех потоков информации, принцип адаптации и развития, предусматривающий приспосабливаемость автоматизированной системы к реальным условиям проектирования. Программы должны работать в автономном режиме, а система предусматривать возможность увеличения своего объема и подключения к другим системам.

Большинство систем автоматизированного проектирования, предлагаемых в настоящее время, отвечают данным требованиям и решают следующие задачи:

- в области CAD: 2D и 3D моделирование с использованием новейших технологий параметризации, ассоциативных сборок, диалогового управления проектами и другими специальными инструментами; подготовка конструкторской документации в соответствии с российскими стандартами, поддержка международных стандартов;
- в области CAM: технологическая подготовка производства, подготовка управляющих программ (УП) для станков с ЧПУ и имитация обработки для контроля и редактирования УП;
- в области CAE: конечно-элементный анализ изделий. Визуализация напряжений и деформаций конструкции. Расчеты на прочность, динамический и кинематический анализы;
- в области TDM/PDM: техническая подготовка производства, создание технологической и нормативно-сметной документации, управление проектами и техническим документооборотом.

В настоящее время опыт предприятий, внедряющих КИПС, показал экономическую эффективность применения таких систем, но расширению их использования препятствует высокая стоимость рабочих мест. С другой стороны на предприятиях, эксплуатирующих отдельные системы автоматизации низкой стоимости, все более ощущается ограниченность их функциональных возможностей. Поэтому перед каждым машиностроительным предприятием рано или поздно возникает ряд проблем:

- какую систему выбрать в качестве базовой для наиболее эффективной автоматизации имеющегося комплекса конструкторско-технологических задач с учетом специфики конкретного предприятия;
- какие модули и в какой последовательности рационально приобретать и внедрять;
- как экономически определить эффект (или убытки) при различных вариантах автоматизации производства;
- какая реорганизация служб производства потребуется в связи с внедрением информацион-

ных технологий.

Очевидно, целью автоматизации производства является увеличение количества и качества проектируемых технологических процессов, а также сокращение сроков проектирования и количества инженеров. Таким образом, в конечном счете, целью автоматизации является получение экономического эффекта по сравнению с неавтоматизированным производством.

При определении ожидаемого эффекта от внедрения систем автоматизации необходимо провести :

- анализ затрат и потерь существующего производства;

- анализ затрат и экономии от внедрения систем автоматизации.

В настоящее время практически отсутствуют соответствующие научно-методические разработки, которые позволили бы определить эффект от внедрения как отдельных систем, так и КИПС в целом.

В сфере автоматизации собственно производства материальных потоков в качестве научно-методической основы решения практических задач широко применяется теория производительности машин и труда (ТПМ), основы которой разработал Г. А. Шаумян в 1932-33 гг.

Представляется целесообразным для обеспечения научно-методического единства применить основные идеи и математический аппарат этой теории и к сфере конструкторско-технологической подготовки производства (КТПП) (соответственно с учетом специфики этой сферы). Это позволит не только подсчитать экономическую эффективность КИПС, но и проанализировать различные возможные варианты средств автоматизации, выбирать такие системы автоматизированного проектирования, которые являются оптимальными и обеспечивают максимальную производительность или наибольший экономический эффект в данных производственных условиях.

На этапе анализа затрат существующего производства рассматриваются показатели, определяющие себестоимость продукции и производительность обработки.

Исходя из теории производительности себестоимость базового варианта характеризуется следующими параметрами:

- K – стоимость оборудования (кульманы, столы и пр.);

- $З$ – годовой фонд зарплаты (зарплата инженерно-технических рабочих);

- m – годовые эксплуатационные затраты (расходные материалы, электроэнергия и пр.);

- Q_c – объем разработанной конструкторско-технологической документации за год;

- S – затраты на исправление ошибочных решений, допущенных на различных этапах жизненного цикла изделия.

Амортизационные отчисления на восстановление стоимости и на ремонт (капитальный и средний) рассчитывают как процент от капитальной стоимости оборудования $K\alpha_1$, где α_1 – нормативный коэффициент амортизационных отчислений.

Затраты на текущий ремонт и межремонтное обслуживание принимаются также пропорциональными ожидаемой стоимости K в размере $K\alpha_2$.

Тогда себестоимость объема разработанной конструкторско-технологической документации за год по базовому варианту

$$C_1 = K(\alpha_1 + \alpha_2) + m + З + \mathrm{S}. \qquad (1)$$

Анализ затрат и экономии от внедрения КИПС должен быть основан на оценке как количественных, так и качественных показателей, таких как:

- показатели прямой экономии, имеющих количественный характер;

- показатели косвенной экономии, сочетающих как количественные, так и качественные оценки;

- факторы экономии, имеющих качественный характер.

Характеристики проектного варианта должны обеспечивать гарантированный экономический эффект. Поэтому будем использовать вариационные показатели, которые являются управляемыми:

φ – рост производительности средств производства;

ε – коэффициент сокращения затрат живого труда;

σ – коэффициент изменения средств труда;

δ – коэффициент изменения эксплуатационных затрат на единицу продукции.

Тогда по проектному варианту:

- $K\sigma$ – стоимость оборудования (стоимость вычислительной техники и CAD/CAM/CAE систем);

- $З/\varepsilon$ – фонд зарплаты (зарплата инженерно-технических рабочих и программистов);

- $Q_c\varphi$ – объем разработанной конструкторско-технологической документации за год;

- $m\delta\varphi$ – годовые эксплуатационные затраты;

- α_3 – коэффициент, учитывающий затраты на продление лицензий и обновление программного обеспечения;

- S_2– стоимость исправления ошибок.

Тогда себестоимость годового выпуска по проектному варианту

$$C_2 = K\sigma(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + m\delta\varphi + З/\varepsilon + \mathrm{S}_2. \qquad (2)$$

В формулах (1) и (2) основную долю затрат составляют затраты на исправление ошибочных решений, возникающих при конструировании, технологической подготовки производства и планировании. Еще пятнадцать лет назад аналитическая компания Gardner Group произвела оценку стоимости исправления одной-единственной ошибки на различных этапах подготовки производства:

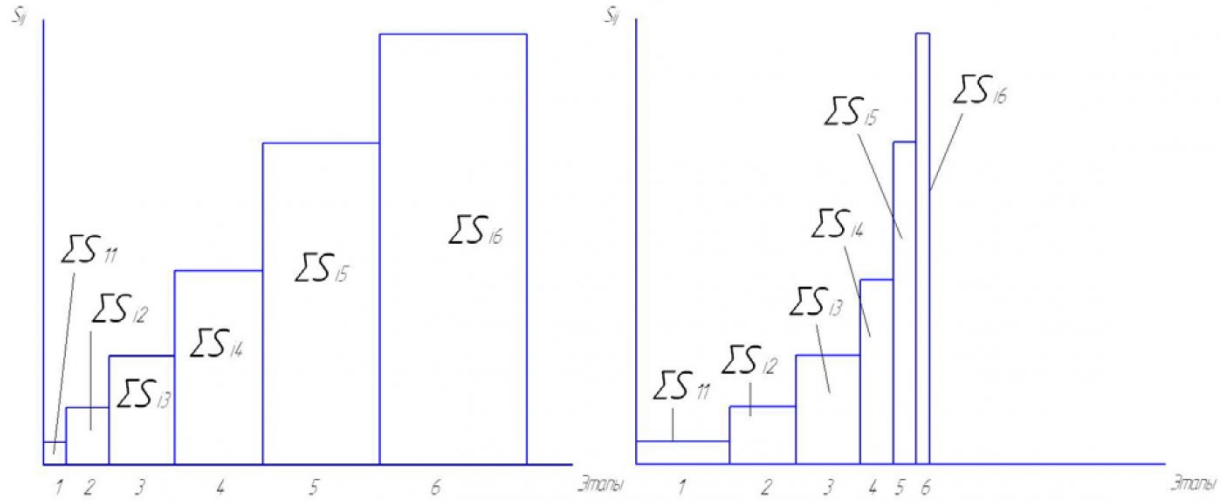

Рис. 1. Распределение затрат на устранение ошибки при неавтоматизированной системе КТПП и при внедрении КИПС

Концептуальное проектирование	$1
Конструкторская проработка изделия	$10
Изготовление макета изделия	$100
Проектирование технологической оснастки	$1,000
Изготовление оснастки	$10,000
Выпуск установочной серии	$100,000
Серийное производство	$1,000,000

Очевидно, что учет затрат на исправление ошибок и, соответственно, расчет возможной экономии при автоматизации конструкторско-технологических работ, требует более подробного рассмотрения.

На этапе серийного производства обычно все ошибки, допущенные на более ранних этапах, будут выявлены

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\gamma_{\text{ij}} = 1, \text{ при } (i \le j), \qquad (3)$$

где γ_{ij} – вероятность (доля ошибок) обнаружения на j-м этапе ошибки, допущенной на i-м этапе; n – число рассматриваемых этапов жизненного цикла изделия.

Так как затраты на исправление ошибок существенно зависят от разрыва времени между моментами ее создания и обнаружения, введем соответственно S_{ij} – средние затраты на исправление одной ошибки, допущенной на i-м этапе и обнаруженной на j-м этапе.

Если обозначить общее число ошибок за N, то

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\text{N}\gamma_{\text{ij}} = N\,. \qquad (4)$$

Очевидно, общие затраты на исправление ошибочных решений

$$\text{S} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\text{N}\gamma_{\text{ij}}S_{ij}\,. \qquad (5)$$

Влияние внедрения КИПС на достоверность конструкторско-технологических решений будет осуществляться по двум направлениям:

- уменьшение общего числа ошибочных решений, т.е. $N_1 > N_2$;
- обнаружение ошибочных решений на более ранних этапах (в идеале $i = j$) и устранение их с меньшими затратами.

Своевременность принятия и вероятность получения правильного решения, как правило, возрастают, если вся информация, необходимая для принятия решения, пропускается через корпоративную информационную систему, а не локализуется в бумажных архивах и персональных компьютерах отдельных служб и подразделений. Данное положение можно иллюстрировать рис. 1. На рис. 1, а показаны возможные затраты и их распределение по этапам при неавтоматизированной системе КТПП, на рис. 1, б – при внедрении КИПС. Площадь гистограмм показывает суммарные затраты на устранение ошибок. Показано, что время обнаружения большей части ошибок при автоматизации смещается на более ранние этапы (что может даже вызвать некоторое увеличение затрат на ранних этапах) и характер распределения затрат существенно меняется. На гистограмме высота столбика характеризует затраты на устранение одной ошибки (принято, что стоимость устранения ошибки одинакова для обоих вариантов, в условиях интегрированной корпоративной информационной среды эта стоимость на ранних этапах снижается), а его ширина – число обнаруженных на этапе ошибок.

Автоматизация различного количества этапов производственного цикла приводит к увеличению себестоимости (C_2) в основном за счет затрат на приобретение и обслуживание систем автоматизации. Себестоимость неавтоматизированного производства (C_1) на первых этапах ниже себестоимо-

сти C_2, но увеличение затрат на исправление ошибок приводит к резкому возрастанию себестоимости C_1. Если объем производимой продукции (количество конструкторско-технологической документации) будет увеличиваться, то для определения эффективности сравним оба варианта по критерию минимум приведенных затрат

$$C_n = KE_н + C, \qquad (6)$$

где $E_н$ – коэффициент эффективности капитальных вложений.

Тогда приведенные затраты по базовому и проектному вариантам с учетом формулы (5) будут выглядеть

$$C_{n1} = \varphi(K(E_н + \alpha_1 + \alpha_2) + m + З + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} S_{ij}\gamma_{ij}^{б}\mathrm{N}) \qquad (7)$$

$$C_{n2} = K\sigma(E_н + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + m\delta\varphi + З/\varepsilon + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} S_{ij}\gamma_{ij}^{пр}\mathrm{N} \qquad (8)$$

Годовой экономический эффект будет выражен следующей формулой

$$Э = C_{n1} - C_{n2} = \mathrm{K}[(\varphi - \sigma)(E_н + \alpha_1 + \alpha_2) - \sigma\alpha_3] + m\varphi(1-\delta) + З\left(\varphi - 1/\varepsilon\right) + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\mathrm{S_{ij}}N\left(\gamma_{ij}^{б}\varphi - \gamma_{ij}^{пр}\right).$$

В этом случае использование средств автоматизации на различных этапах приведет не только к сокращению затрат на исправление ошибок, но и к увеличению коэффициента φ за счет роста производительности труда. Таким образом, как и в первом случае можно определить минимальное количество этапов и функций, выполняемых на этих этапах, которые нужно автоматизировать, чтобы получить гарантированный экономический эффект.

Такая модель может служить основой для решения целого ряда задач:

а) расчета технико-экономических допусков, то есть значений технических характеристик проектируемых средств автоматизации инженерного труда, исходя из гарантированного экономического эффекта при внедрении, то есть можно оценить созрели ли технические и экономические предпосылки для автоматизации данного производства по тем или иным вариантам;

б) расчета оптимальных с экономической точки зрения отдельных технических характеристик, то есть задача однопараметрической оптимизации;

в) определения экономически оптимальных вариантов из множества технически возможных, то есть комплексной оптимизации проектных решений.

Как было сказано, одной из важнейших задач фундаментального направления науки об автоматизации производственных процессов является установление функциональных взаимосвязей технических и экономических показателей – не только абсолютных (производительность, надежность, себестоимость и других конкретных вариантов), но и в первую очередь – сравнительных как инструмента не только сопоставления конкретных вариантов и направлений развития автоматизации, но и определения ее стратегии.

Если мы примем Э = 0, то можно определить $\varphi_i = \varphi_{i\min}$, при котором варианты равноценны. Очевидно, если $\varphi_i > \varphi_{i\min}$, то второй вариант лучше

$$\varphi_{\min} = \frac{K\sigma\left(E_н + \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3\right) + \frac{З}{\varepsilon} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} S_{ij}\gamma_{ij}^{пр}\mathrm{N}}{K\left(E_н + \alpha_1 + \alpha_2\right) + m(1-\delta) + З + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} S_{ij}\gamma_{ij}^{б}\mathrm{N}}. \qquad (9)$$

Оценивая ожидаемые дополнительные капитальные затраты, ожидаемое сокращение количества обслуживаемого персонала в совокупности с требуемым повышением производительности оборудования, а также с реальными возможностями этого повышения с использованием имеющихся технических средств, можно реально оценить, насколько достижимыми являются те технические рубежи, которые необходимо преодолеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Волчкевич Л. И.* Автоматизация производственных процессов: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2005.

Автор статьи:

Трусов
Александр Николаевич
– канд. техн. наук, доц. каф. «Информационные и автоматизированные производственные системы» КузГТУ. Тел. 8(3842)39-63-24.
E-mail: trusow2001@mail.ru.