

УДК 338. 45: 621

Н.А. МИХАЙЛОВА

ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПРИ СОЗДАНИИ ИЗДЕЛИЯ НА ЗАДАННУЮ СЕБЕСТОИМОСТЬ

Рассматривается проблема выбора конструктивно-технологических решений на ранних стадиях проектирования деталей ГТД. Представлено описание влияния производственной трудоемкости (как одного из показателей технологичности конструкции деталей ГТД) на формирование экономических показателей изделия. Предложена система многофакторных статистических моделей прогнозирования трудоемкости серийного изготовления деталей ГТД по типовым тех. процессам. В моделях учитывается влияние конструктивных, технологических и организационно-технических факторов, что обеспечивает высокую точность расчетов.

газотурбинные двигатели, прогнозирование трудоемкости изготовления, многофакторные модели, технологичность

Введение

Прогноз трудоемкости производства газотурбинных двигателей (ГТД) необходим на ранней стадии проектирования изделий, поскольку позволяет обосновать цену контракта на поставку двигателя с учетом себестоимости его производства.

Расходы, относимые на основную заработную плату основных производственных рабочих и определяемые трудоемкостью изготовления ГТД, составляют, в среднем, 4÷7% от полной себестоимости двигателя. В то же время, несмотря на небольшую долю в себестоимости, эта статья калькуляции является одной из важнейших при прогнозировании себестоимости в связи с тем, что расходы по содержанию и эксплуатации оборудования, цеховые и общезаводские расходы обычно рассчитываются в процентах к производственной зарплате и составляют по отношению к ней 400% и более. Ошибка в определении трудоемкости и суммы расходов на заработную плату основных производственных рабочих существенно влияет на точность прогнозирования производственных затрат при создании изделия на заданную себестоимость.

На трудоемкость и стоимость изготовления в се-

рийном производстве современных ГТД в значительной мере влияет технологичность конструкции деталей двигателя, поэтому на ранних стадиях проектирования для обеспечения расчетного лимита себестоимости ГТД необходима отработка деталей двигателя на технологичность.

Формулирование проблемы. Существующие методы прогнозирования не могут быть использованы на ранних стадиях проектирования (модели не отражают многовариантность технологических решений, построены для среднеотраслевого уровня технологии и включают параметры, известные лишь на последних этапах проектирования, то есть при анализе необходимо иметь рабочие чертежи). Необходимо разработка нового метода, позволяющего по ограниченной конструкторской и технологической информации об изделии определять его трудоемкость и себестоимость.

Решение проблемы

Для решения проблемы автором предлагается метод оценки и выбора конструктивно-технологических решений в условиях ограниченной информации о конструкции, в основе которого лежат автор-

ские многофакторные статистические модели, описывающие взаимосвязи параметров конструкции, характеристик технологического процесса и технико-экономических показателей, характеризующих технологичность конструкции: деталей, узлов и ГТД.

Построение моделей включает решение следующих задач:

- 1) анализ закономерностей формирования основных показателей технологичности (автор исследует проблему формирования производственной трудоемкости), включающий анализ структуры технологического процесса, взаимосвязей его характеристик с конструктивными параметрами и показателями технологии;
- 2) выявление основных характеристик технологических процессов, определяющих формирование показателей технологичности;
- 3) выбор наиболее важных конструктивных и технологических факторов, влияющих на уровень трудоемкости;
- 4) формализованное описание процесса формирования трудоемкости конструкции;
- 5) численное решение конкретных математических моделей.

Данная методика предназначена для прогнозирования трудоемкости деталей ГТД, изготавливаемых в серии по типовым технологическим процессам, при производстве изделия на заданную себестоимость, применима на ранних стадиях проектирования [1 – 3] и успешно используется в ОАО «НПО «Сатурн», в частности, при прогнозировании трудоемкости и себестоимости новой техники на предпроектной стадии.

В основе методики лежит Классификатор статистических нормативов трудоемкости деталей ГТД, который сформирован из отдельных листов по наиболее трудоемким деталям ГТД, и служит ориентиром в планировании трудовых затрат изготовления деталей и сборочных единиц в серийном производстве.

Классификатор представляет собой информационную базу, обобщающую типовые технологические процессы предприятия, и позволяющую с высокой точностью – предельная погрешность 5-7% – (табл. 1) прогнозировать трудовые затраты в производстве. Помимо этого, с помощью разрабатываемого Классификатора решается проблема создания, накопления и актуализации нормативного хозяйства ОАО «НПО «Сатурн» по прогнозированию трудоемкости ГТД.

Автором ведется работа по расширению и актуализации Классификатора с целью обеспечения его информационного насыщения, позволяющего определять трудоемкость узлов и ГТД в целом [3].

Формирование трудоемкости как показателя технологичности конструкции рассматривается в виде информационного процесса, основными параметрами которого являются методы обработки, конструктивные особенности и геометрические размеры деталей, свойства материала.

Создание многофакторных статистических моделей формирования трудоемкости основных деталей ГТД зачастую затруднено в связи с многостадийностью технологических процессов. Поэтому формирование трудоемкости целесообразно рассматривать по стадиям технологического процесса. При таком подходе для каждой стадии определяются элементы трудоемкости и строятся локальные модели, которые затем объединяются в общую систему математических моделей формирования трудоемкости.

Так, на рис. 1 представлен лист Классификатора «Сектора СА (2 лопатки в блоке). Метод ЭХО», на котором приведена система многофакторных моделей. Автором разработаны модели трудоемкости изготовления деталей отдельно для каждого цеха, участвующего в технологическом процессе (табл. 1): Y_{49} , Y_{12} , Y_{60} , Y_{93} , при наложенных условиях образующих систему уравнений для формирования производственной трудоемкости лопаток СА.

Таблица 1

Оценка точности модели по цехам (А – коэффициент пропорциональности)

Лопатка	К.49				К.12			
	Фактич. трудоемкость, н/ч	Модельная трудоемкость, н/ч	Дельта, н/ч	Отклонение, %	Фактич. трудоемкость, н/ч	Модельная трудоемкость, н/ч	Дельта, н/ч	Отклонение, %
820450079	A×3,118	A×3,355	A×0,237	7,1%	A×2,265	A×2,252	A×(-0,014)	-0,6%
830450034	A×3,810	A×3,540	A×(-0,271)	-7,6%	A×2,714	A×2,659	A×(-0,056)	-2,1%
E60460016	A×4,273	A×4,270	A×(-0,003)	-0,1%	A×2,531	A×2,553	A×0,022	0,9%
E60460018	A×4,173	A×4,148	A×(-0,025)	-0,6%	A×2,476	A×2,495	A×0,019	0,8%
E90460016	A×4,558	A×4,603	A×0,046	1,0%	A×2,631	A×2,659	A×0,028	1,1%
E90460018	A×4,605	A×4,636	A×0,032	0,7%	A×2,518	A×2,518	A×(-0,001)	-0,01%

Лопатка	К.93				К.60			
	Фактич. трудоемкость, н/ч	Модельная трудоемкость, н/ч	Дельта, н/ч	Отклонение, %	Фактич. трудоемкость, н/ч	Модельная трудоемкость, н/ч	Дельта, н/ч	Отклонение, %
820450079	A×0,118	A×0,121	A×0,003	2,2%	A×0,074	A×0,070	A×(-0,005)	-6,5%
830450034	A×0,119	A×0,124	A×0,004	3,4%	A×0,175	A×0,166	A×(-0,010)	-5,6%
E60460016	A×0,146	A×0,138	A×(-0,008)	-5,8%	A×0,176	A×0,194	A×0,018	9,3%
E60460018	A×0,137	A×0,134	A×(-0,004)	-2,4%	A×0,165	A×0,179	A×0,015	8,0%
E90460016	A×0,156	A×0,156	A×0,0001	0,0%	A×0,202	A×0,203	A×0,001	0,5%
E90460018	A×0,153	A×0,158	A×0,005	2,9%	A×0,202	A×0,188	A×(-0,014)	-7,6%

Такой подход позволяет анализировать и оценивать возможные изменения в технологическом маршруте детали. Помимо этого не происходит накопления суммарной ошибки расчетов.

Формирование элементов трудоемкости по стадиям изготовления определяется размерами и допусками на размеры детали, методами обработки.

Метод получения системы многофакторных статистических моделей описан в [2].

Развитием методики и Классификатора может стать создание комплексной автоматизированной системы (САПР), включающей все типовые технологические операции и переходы, учитывающей свойства материала, его обрабатываемость, подготовительно-заключительное время и использующей

иерархическую структуру ГТД. Это обусловлено непрерывным изменением конструкции, совершенствованием технологических процессов, а также большим числом факторов, которые должны быть учтены при построении моделей, и представляется возможным при достижении на предприятии уровня автоматизации и унификации тех. процессов, сопоставимого с существующим у мировых лидеров авиадвигателестроения.

В таком случае САПР позволит создавать оригинальные конструктивно-технологические решения в рамках использования наиболее эффективных типовых технологических цепочек и в режиме реального времени определять трудоемкость и себестоимость производства деталей, узлов и ГТД в целом.

Сектора СА (2 лопатки в блоке). Метод ЭХО

Ступень	№ чертежа	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	Y _{49_факт}	Y _{12_факт}	Y _{60_факт}	Y _{93_факт}	Y _{сумм_факт}	Y _{сумм_модель}	Дельта Y_сумм	От- клоне- ние
		A	K	L						к.49	к.12	ц.60	ц.93	Итого			
		мм	мм	мм	кг	шт.	мм	шт.	мм	н/ч	н/ч	н/ч	н/ч	н/ч	н/ч	н/ч	н/ч
2	820450079	46,5	73,9	55,5	0,443	2	41,34	0	0	A×3,118	A×2,265	A×0,074	A×0,118	A×5,575	A×5,798	A*0,2225	3,8%
2	830450034	51,5	94,2	67,8	0,55	2/2	54,4*/ 62,5**	0	0	A×3,810	A×2,714	A×0,175	A×0,119	A×6,818	A×6,486	A*(-0,3325)	-5,1%
2	E60460016	67,5	118,8	66,2	1,25	2	94,32	2	59,1	A×4,273	A×2,531	A×0,176	A×0,146	A×7,125	A×7,152	A*0,0275	0,4%
3	E60460018	64	110,35	58,08	1,16	2	79,16	2	55,35	A×4,173	A×2,476	A×0,165	A×0,137	A×6,950	A×6,953	A*0,0035	0,1%
2	E90460016	66,8	122,2	89,06	1,5	2	97,61	2	67,28	A×4,558	A×2,631	A×0,202	A×0,156	A×7,546	A×7,623	A*0,0775	1,0%
3	E90460018	67,2	116,8	81,93	1,61	2	84,74	2	60,66	A×4,605	A×2,518	A×0,202	A×0,153	A×7,477	A×7,501	A*0,0235	0,3%

Суммарная трудоемкость изготовления секторов СА

$$Y=Y_{49}+Y_{12}+Y_{60}+Y_{93}$$

$$Y_{49}=A \times (2,9244 + 0,27167 \times (1,500418 \times X4 \times 1,500737 \times X2) / X1),$$

$$Y_{12}=A \times (5,3524 - 4,92772 \times X1 / X2),$$

$$Y_{60}=A \times 0,5424 \times (X5 \times (0,000719345 \times X6 + 0,034121783) + X7 \times (0,000719345 \times X8 + 0,034121783)),$$

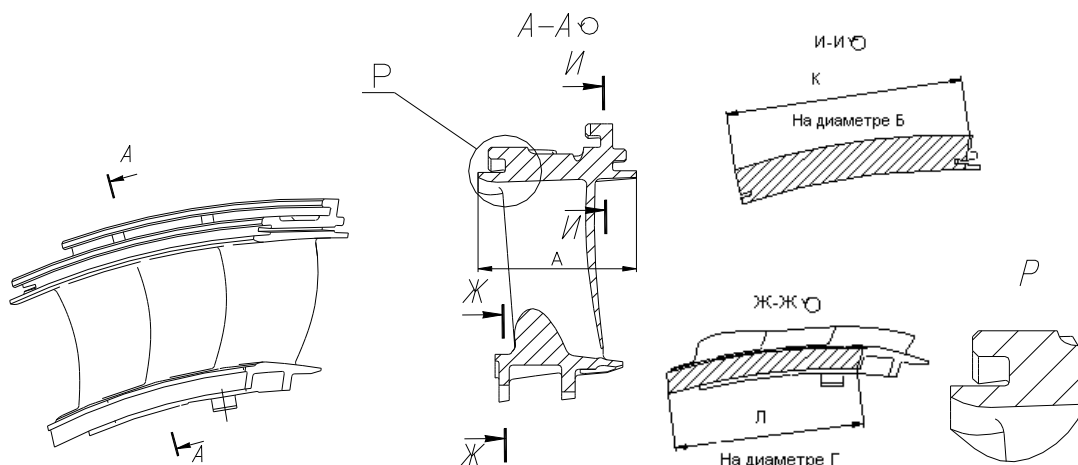
$$Y_{93}=A \times (0,1049 + 0,04662 \times (X3 \times X4) / X2),$$

где Y₁₂ – трудоемкость в к.12, н/ч,

Y₄₉ – трудоемкость в к.49, н/ч,

Y₆₀ – трудоемкость в ц.60, н/ч,

Y₉₃ – трудоемкость в ц.93, н/ч.



Примечание: Доля трудоемкости ц.54 (упаковка деталей) составляет менее 1% общей трудоемкости изготовления секторов СА, и через данный цех проходят только 2 лопатки СА (820450079 и 830450034), поэтому разработка модели Y54 не представляется целесообразной.

* – Пазы под уплотнительные элементы со стороны корыта.

** – Пазы под уплотнительные элементы со стороны спинки.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	Факторы модели взаимосвязаны и не могут задаваться произвольно
X1 – Ширина верхней полки блока лопаток: 46,5 ÷ 67,5 мм X2 – Хорда на верхней полке: 73,9 ÷ 122,2 мм X3 – Хорда на нижней полке: 55,5 ÷ 89,06 мм X4 – Масса детали: 0,443 ÷ 1,61 кг X5 – Количество пазов под уплотнительные элементы на верхней полке: 2 ÷ 4 шт. X6 – Длина паза под уплотнительные элементы на верхней полке: 41,34 ÷ 97,61 мм X7 – Количество пазов под уплотнительные элементы на нижней полке: 0 ÷ 2 шт. X8 – Длина паза под уплотнительные элементы на нижней полке: 0 ÷ 67,28 мм	ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ: Допуски на геометрические размеры: Профиль лопаток получается литьем, предельные отклонения профиля пера лопаток ±0,35 мм, шероховатость пера Ra 3,2, входная кромка должна быть заполирована с шероховатостью Ra 1,6. Шероховатость на обрабатываемых поверхностях Ra 3,2. Допускается выполнение канавок электроэрозионным методом с шероховатостью Ra 6,3. Точность обработки – наружные диаметры верхней полки по h8 (0,125), остальные – по h10.

Рис. 1. Пример листа Классификатора СНТ – Сектора СА (2 лопатки в блоке). Метод ЭХО

С помощью САПР также возможно решать иные задачи, например, формировать рекомендации по размещению производства ДСЕ по кооперации – путем оценки поставщиков с точки зрения целесообразности заключения с ними контрактов на изготовление деталей: что выгоднее, задействовать собственные производственные силы или привлечь поставщика на наиболее выгодных условиях.

Кроме того, по результатам функционально-стоимостного анализа конструкции и техпроцессов САПР позволит решить задачу выбора наиболее эффективных технологических процессов не только самого предприятия, но и его поставщиков, а также дать необходимые рекомендации по снижению производственной себестоимости.

Если анализ, выполняемый по результатам исследования рынка, выявит превышение среднерыночной цены деталей поставщиком, а он при этом не следует рекомендациям по снижению себестоимости и не принимает мер по снижению цены, то с ним не рекомендуется заключать контракт.

Выводы

В рамках управления себестоимостью, помимо решения поставленной проблемы, использование предлагаемой методики позволяет решать ряд задач предприятия:

1. Наличие методики является одним из необходимых условий реализации проектирования на заданную себестоимость.
2. Для коммерческих служб предприятия – своевременно, оперативно (в реальном масштабе времени), с высокой точностью определять трудоемкость (погрешность не более 10%) и себестоимость узлов и ГТД в целом в зависимости от конструктивно-технологических особенностей изделия,

что требуется при обосновании условий контрактов на разработку и поставку новой техники на этапе аванпроекта.

3. Для технологов Классификатор должен служить ориентиром в планировании трудовых затрат изготовления ДСЕ в серийном производстве, а также решает задачу создания, накопления и обновления нормативного хозяйства предприятия.

4. Конструкторам и технологам облегчает унификацию деталей, конструкции узлов ГТД и типизацию тех. процессов.

Литература

1. Ицкович И.И., Михайлова Н.А., Пономарев В.А. Сопоставление методов управления себестоимостью изготовления деталей ГТД в ОАО «НПО «Сатурн» (Россия) и Snecma Moteurs (Франция). Сб. тез. докл. Всероссийской научн.-техн. конф. молодых ученых и специалистов. – М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2005. – С. 40-41.
2. Ицкович И.И., Михайлова Н.А., Пономарев В.А. Создание статистических нормативов трудоемкости изготовления деталей газотурбинных двигателей в ОАО «НПО «Сатурн» // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4/20. – С. 83-87.
3. Ицкович И.И., Михайлова Н.А.. Прогнозирование трудоемкости изготовления газотурбинного двигателя на основе Классификатора статистических нормативов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9/35. – С. 31-37.

Поступила в редакцию 31.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Л. Михайлов, ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск.