

УДК 004.65

МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Ж. М. Кадырова¹, В. Л. Юрьев²

¹prep08@mail.ru

¹ОАО «Институт технологии и организации производства» (ОАО НИИТ)

²ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 10 ноября 2014 г.

Аннотация. В рамках методики определения трудоемкости изготовления авиационных ГТД предлагается рассмотреть работы различных авторов по определению трудоемкости.

Ключевые слова: трудоемкость; математическая модель; полимерные композиционные материалы; кривая обучения.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность данной публикации определяется целью государственной программы «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы», а именно созданием высококонкурентной авиационной промышленности.

Цели и задачи. Повышение конкурентоспособности требует изменения подходов к управлению затратами на производство, в частности трудозатрат. Ключевыми технологиями, призванными обеспечить конкурентоспособность изделия по техническим и экономическим параметрам, являются технологии полимерных композиционных материалов (ПКМ). Прежде чем приступать к самостоятельному анализу и прогнозированию трудоемкости на промышленном предприятии с точки зрения применения в производстве ПКМ, целесообразно провести

обзор литературы по теме анализа и прогнозирования изготовления изделий на промышленном предприятии.

Практическая полезность данной публикации обуславливается анализом и обобщением существующих на данный момент методов и моделей прогнозирования трудоемкости изготовления изделия в авиационной промышленности.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТРУДОЁМКОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

В проектном деле применяют большое число методов расчета суммарной трудоемкости T_{Σ} , преимущественно это методы математического моделирования [1] (табл.1).

Таблица 1

Методы расчета трудоёмкости изготовления изделий

Метод	Формула расчёта	Условные обозначения
Экспертный – аналоговый		масса нового изделия; – удельная трудоемкость на 1 кг массы изделия-аналога, освоенного в производстве; – коэффициент, учитывающий рост производительности труда; коэффициент, учитывающий сложность нового изделия.
Эмпирические: а) по корректирующим множителям		трудоемкость изготовление конструкции-аналога; – коэффициент, учитывающий размерные или весовые различия сопоставляемых конструкций; коэффициент серийности; коэффициент сложности; – коэффициент снижения трудоемкости за период технологической подготовки производства.

Метод	Формула расчёта	Условные обозначения
б) кривая Райта	$T_x = T_1 X^m$	T_1 – трудоемкость первого изделия; X – порядковый № выпущенного изделия; m – отрицательный показатель степени.
в) кривая освоения	$T = b N_c^{-m}$	T – трудоемкость изделия, соответствующая выпуску изделий/сут.; b – постоянная величина, соответствующая трудоемкости изготовления 1 изделия/сут.; N_c – суточный выпуск изделий, при котором определяется трудоемкость изделия; m – отрицательный показатель степени, различный для разнотипных изделий.
Многофакторные регрессионные (пример)	$\begin{cases} T_n = a_0 N^{0,46} \\ a_0 = 38,87 K^{-1,04} \times \\ \times V^{-0,18} t^{-0,61} \end{cases}$	N – количество электрорадиоэлементов выпуску изделий/сут.; K – коэффициент использования материалов; V – годовая программа выпуска; t – число лет в производстве.

МОДЕЛЬ ТРУДОЗАТРАТ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ

В [2] предлагается 2 метода оценки экономического эффекта инвестиций в обучение на производстве. Первый – через индекс кумулятивных трудозатрат. Его формула, выведенная из функции Райта:

$$C_{L,N} = N^{1+\log_2 L}, \quad (1)$$

где N – номер произведенной единицы продукции, начиная с первой; L – «уровень (норма) обучения» – величина, характеризующая долю, которую составляют средние трудозатраты от их первоначальной величины при удвоении совокупного объема производства $L=2^k$, где k – параметр кривой обучения из модели Райта.

Таким образом, рассчитан экономический эффект инвестиций в обучение на производство как

$$R = Y_1(C_{L_1,N} - C_{L_2,N} + C_{L_1,N+M} - C_{L_2,N+M}), \quad (2)$$

где Y_1 – трудозатраты на производство первой единицы продукции; N – количество единиц продукции, произведенных к началу периода инвестирования; M – количество единиц продукции, произведенных в течение периода инвестирования; L_1 – уровень обучения до начала периода инвестирования; L_2 – уровень обучения в течение периода инвестирования.

Данный метод используется на начальном этапе процесса обучения на производстве.

Второй метод основан на расчете трудозатрат однородной группы персонала, периодически выполняющей фиксированный объем работ ω , $-T_\omega$. При этом T_ω – функция случайного аргумента B (производительности труда данной группы). Величина B определена автором как

случайная величина, распределенная по усеченному нормальному закону распределения и имеющая постоянное значение в течение всего времени выполнения объема работ ω . Данный подход позволил автору получить дифференциальный закон распределения для сечения T_ω . При $B \in (0; \infty)$ плотность распределения T_ω :

$$p(T_\omega) = \frac{c\alpha\theta}{T_\omega^2\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\alpha^2}{2}\left(\frac{0}{T_\omega} - 1\right)\right\}, \quad (3)$$

где α – относительная средняя производительность труда; θ – характеристический объем трудозатрат; c – константа ($c \approx 1$ при $\alpha > 2$). Параметр θ характеризует объем трудозатрат, соответствующий производительности труда $B = m_b$.

Также представлена функция вероятности выполнения однородной группой персонала объема работ ω при заданных трудозатратах T_ω :

$$q(T_\omega) = \int_0^{T_\omega} p(T) dT, \quad (4)$$

где $p(T)$ – плотность распределения (4). Подставив (3) в (4), автор предлагает найти трудозатраты $T_\omega(q; t)$ данной группы в момент t , необходимые для выполнения работ ω с вероятностью q .

Данная модель, несмотря на то, что является обобщением эмпирической модели процесса обучения на производстве, также является аналогом теоретических моделей эндогенного экономического роста. Излишняя теоретизированность может вызвать затруднения при практическом применении специалистами предприятия. Также модель не учитывает применение новых технологий и новых материалов.

МОДЕЛЬ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРУДОЕМКОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГТД В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В работе [3] предложен так называемый классификатор статистических нормативов трудоёмкости на основе многофакторных статистических моделей, узлов и ГТД в целом на этапе их проектирования, а также уточненная модель изменения трудоёмкости ГТД при освоении в серийном производстве. Уточненная модель известной зависимости для кривой освоения в серийном ГТД, представлена ниже:

$$T_i = T_1 i^{-\lambda K_{\text{парт}} K_{\text{оснащ}}} \quad (5)$$

где T_i – теоретическая трудоёмкость i – го ГТД; i – порядковый номер изделия в производстве; T_1 – трудоёмкость первого ГТД при передаче его в серийное производство, н/ч; λ – показатель степени, связанный с уровнем механизации производства – назначается или линейно интерполируется из расчета $K_{\text{мех}}$ – доли механических работ в суммарной трудоёмкости изделия; $K_{\text{парт}}$ – показатель размера партии изготовления изделий, учитывающий снижение трудоёмкости с ростом размера тии; $K_{\text{оснащ}}$ – показатель оснащённости производства, определяется исходя из планируемого уровня выпуска изделий, $0 \leq K_{\text{оснащ}} \leq 1$.

Модель [3] позволяет прогнозировать трудоёмкость производства предприятий авиационной отрасли, имеющих типовые техпроцессы производства. Это позволяет несколько упростить анализ трудоёмкости. При этом конкурентоспособность предприятий не страдает. Но провести прогноз трудоёмкости новых изделий из новых материалов по данной модели не представляется возможным.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ОБЩЕЙ НАЧАЛЬНОЙ ТРУДОЕМКОСТИ ИЗДЕЛИЯ И ОБЩЕЙ ТРУДОЕМКОСТИ ОСВОЕННОГО ИЗДЕЛИЯ

В работе [4] представлены алгоритмы расчета общей начальной трудоёмкости изделия и общей трудоёмкости освоённого изделий приведены на рис. 1 и 2.

Общая трудоёмкость изделия модифицированного (ИМ) начального периода производства (желательно брать не общие веса типового изделия (ТИ) и ИМ, а веса непреемственных элементов этих изделий) $T_{\text{нн}}$ рассчитывается как

$$T_{\text{нн}} = \frac{100(T_{\text{нс}} - T_{\text{кс}} K_{\text{пр}}) K_c G_{\text{н}}}{G_c (100 + \text{ПЛ})} + T_{\text{кс}} K_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{нс}}$ – общая трудоёмкость изготовления ТИ начального периода производства; $T_{\text{кс}}$ – общая трудоёмкость изготовления ТИ конечного периода производства; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент конструктивной преёмственности ИМ; $T_{\text{при}}$ – трудоёмкость преёмственных конструктивных элементов ИМ; $T_{\text{ннс}}$ – трудоёмкость непреемственных конструктивных элементов ТИ начального периода; G_c – конструктивный вес ТИ; $t_{\text{ннс}}$ – условная удельная трудоёмкость непреемственных конструктивных элементов ТИ начального периода производства; L – период времени от изготовления первой серии ТИ до изготовления первой серии ИМ (лет); $\text{П}\%$ – ежегодный прирост производительности труда; $G_{\text{н}}$ – конструктивный вес ИМ; $K_{\text{п}}$ – коэффициент снижения трудоёмкости ИМ за счет технического прогресса; K_c – коэффициент конструктивной технологической сложности ИМ; $T_{\text{нп}}$ – трудоёмкость непреемственных конструктивных элементов ИМ начального периода (при равной сложности конструкций ТИ и ИМ и условий производства); $T_{\text{нпн}}$ – трудоёмкость непреемственных конструктивных элементов ИМ начального периода производства.

Общая трудоёмкость освоённого ИМ $T_{\text{н}}$ рассчитывается по формулам (7) и (8).

При $G_c < G_{\text{н}} < 2G_c$

$$T_{\text{н}} = \frac{100 G_{\text{н}} T_c K_c \left[1 - (1 - K_B) \left(\frac{G_{\text{н}}}{G_c} - 1 \right) \right]}{G_c (100 - \text{ПЛ})}, \quad (7)$$

При $G_c > G_{\text{н}} > 0,5G_c$

$$T_{\text{н}} = \frac{200 G_{\text{н}} T_c K_c \left[\frac{(2 - K_B)}{2} - \frac{G_{\text{н}}}{G_c} (1 - K_B) \right]}{G_c K_B (100 - \text{ПЛ})}, \quad (8)$$

где $X\%$ – процент снижения трудоёмкости при удвоении весов изделия (ведомственные нормативы); T_c – общая трудоёмкость освоённого ТИ; t_c – удельная трудоёмкость на 1 кг веса освоённого ТИ; K_B – коэффициент изменения удельной трудоёмкости изделий при удвоении их веса; $t_{\text{н}}$ – удельная трудоёмкость ИМ при равной сложности ИМ и ТИ и равных уровнях техники и организации производства; $T_{\text{нс}}$ – общая трудоёмкость ИМ при равных конструктивной сложности и производственных условиях с ТИ; K – коэффициент снижения трудоёмкости ИМ за счет технического прогресса; K_0 – коэффициент снижения трудоёмкости при удвоении количества выпущенных изделий.

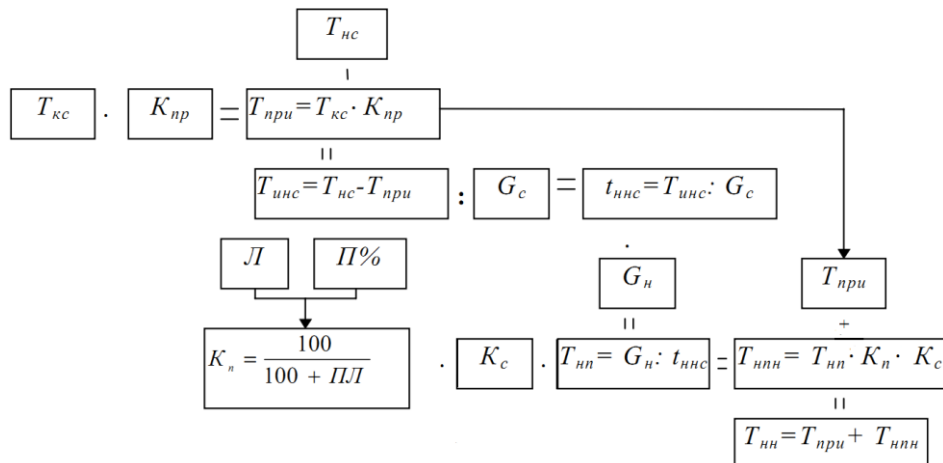


Рис. 1. Алгоритм расчета общей начальной трудоемкости изделия

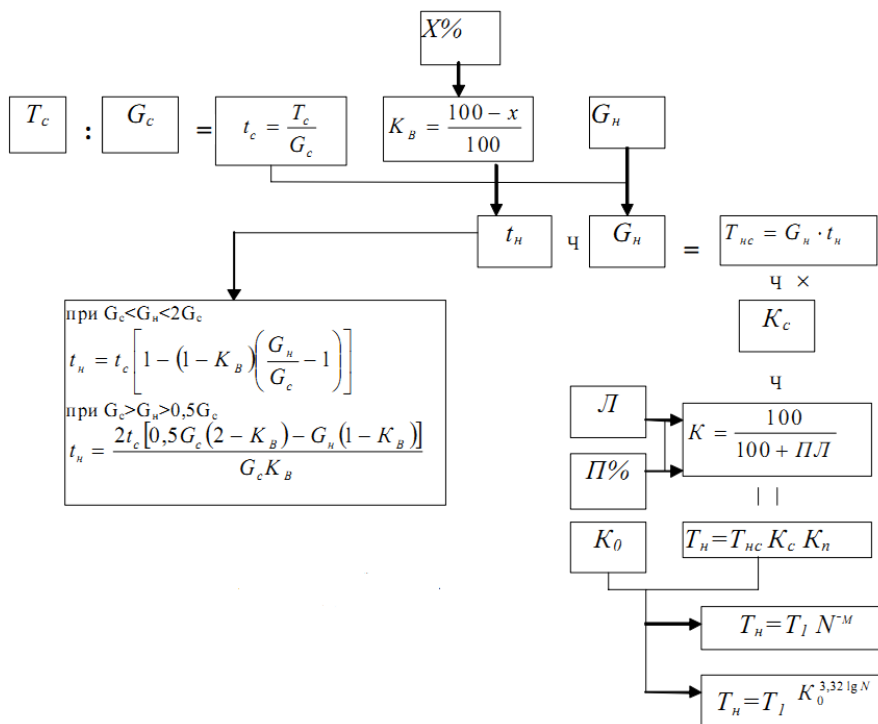


Рис. 2. Алгоритм расчета общей трудоемкости освоенного изделия

Данный метод более удобен для целей планирования объемов производства по периодам уже серийного освоенного изделия. Таким образом, провести прогноз трудоемкости новых изделий из новых материалов по данной модели также не представляется возможным.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТРУДОЁМКОСТИ ОБРАБОТКИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

В работе [5] предлагается математическая модель расчета трудоемкости изготовления раз-

личных изделий ряда предприятий Башкортостана для серийного производства.

$$T_{изд} = 0,165K_{изд} + 0,13710^{-6}K_{изд}^2, \quad (9)$$

где $K_{изд}$ — совокупный показатель трудоемкости изделия.

$$K_{изд} = \sum_{j=1}^n K_{Tj} K_{Cj} P_j, \quad (10)$$

где K_{Tj} — коэффициент относительной трудоемкости обработки материалов, относящихся к

j -ой группе; K_{Cj} – коэффициент относительной стоимости марки материалов в классификации по сравнению со сталью 45; P_j – масса деталей из материалов; n – количество групп материалов.

$$K_{Tj} = \frac{1}{K_{vkj}}, \quad (11)$$

где K_{vkj} – коэффициент обрабатываемости j -й группы материалов.

$$K_{Cj} = 0,613 - 0,00687x_{1j} + 3,12x_{2j} + 0,497x_{3j} + 0,264x_{4j} - 0,42x_{5j} + 0,41x_{6j}, \quad (12)$$

где x_1 – диаметр прутка, мм; x_2 – содержание углерода, %; x_3 – содержание никеля, %; x_4 – содержание хрома, %; x_5 – содержание титана, %; x_6 – содержание молибдена, %.

Модель отражает влияние и коэффициента обработки, и стоимости заготовки детали из металлического сплава, но с точки зрения применения иных материалов (например, ПКМ) данный подход прогноза трудоёмкости является не приемлемым.

МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НОРМИРОВАНИЯ ТРУДОЗАТРАТ В ПРОЦЕССАХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В [6] представил методику универсального описания расчетной и справочной информации для нормирования трудозатрат в условиях машиностроительного производства. А именно, на основе исходной информации маршрутной карты провел построение инфологической модели технологической информации (рис. 3).

Для хранения необходимых объектов справочной информации в специальной структуре базы данных проведена их унификация. Морфологическая модель унифицированной справочной информации представлена на рис. 4.

Для решения задачи нормирования на основе инфологической модели технологической информации построена реляционная структура технологической информации (рис. 5).

Данная методика позволяет структурировать данные по трудозатратам и больше подходит для типовых техпроцессов производства, что несколько поможет упростить анализ трудоёмкости, но не позволит провести прогноз трудоёмкости.

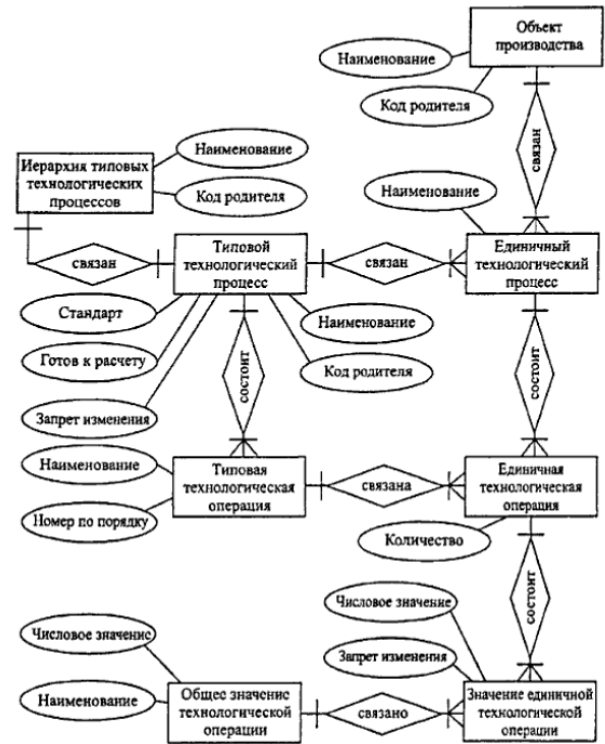


Рис. 3. Инфологическая модель унифицированной технологической информации

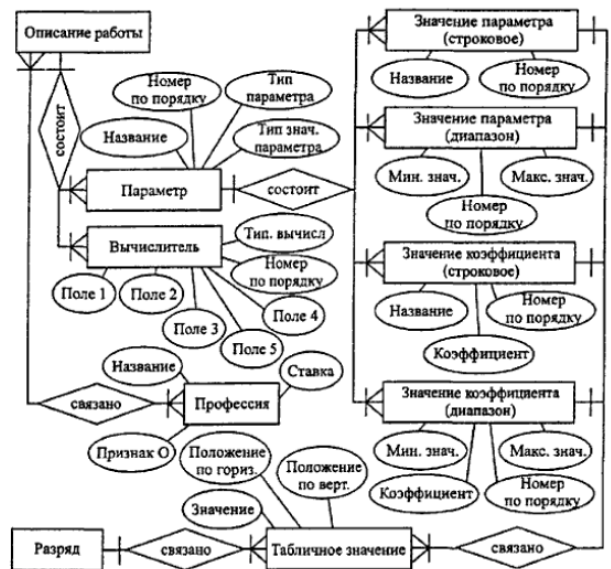


Рис. 4. Инфологическая модель унифицированной справочной информации

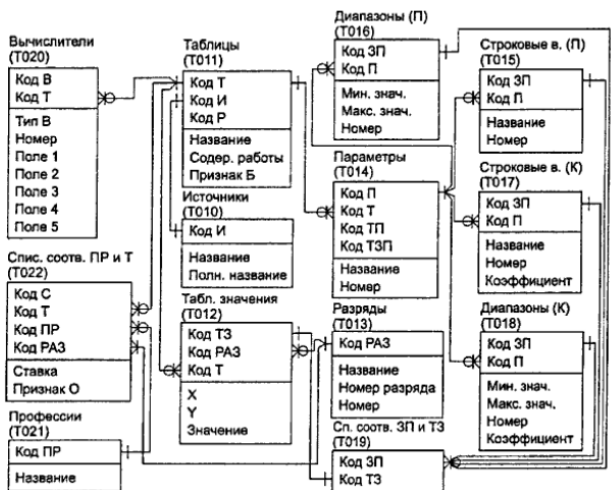


Рис. 5. Реляционная структура в виде ER-диаграммы для хранения объектов справочной информации

Разработан метод формализации нормативных таблиц, алгоритм методики представлен на рис. 6.

Все представленные модели и методы оценки трудоемкости принадлежат к формализованным (количественным) методам анализа (системно-структурным и экстраполяционно-математическим), которые имеют как и преимущества, так и ряд недостатков (табл. 2).

Таким образом, целесообразно сделать вывод о недостаточности анализа трудоемкости изготовления изделий из новых материалов.

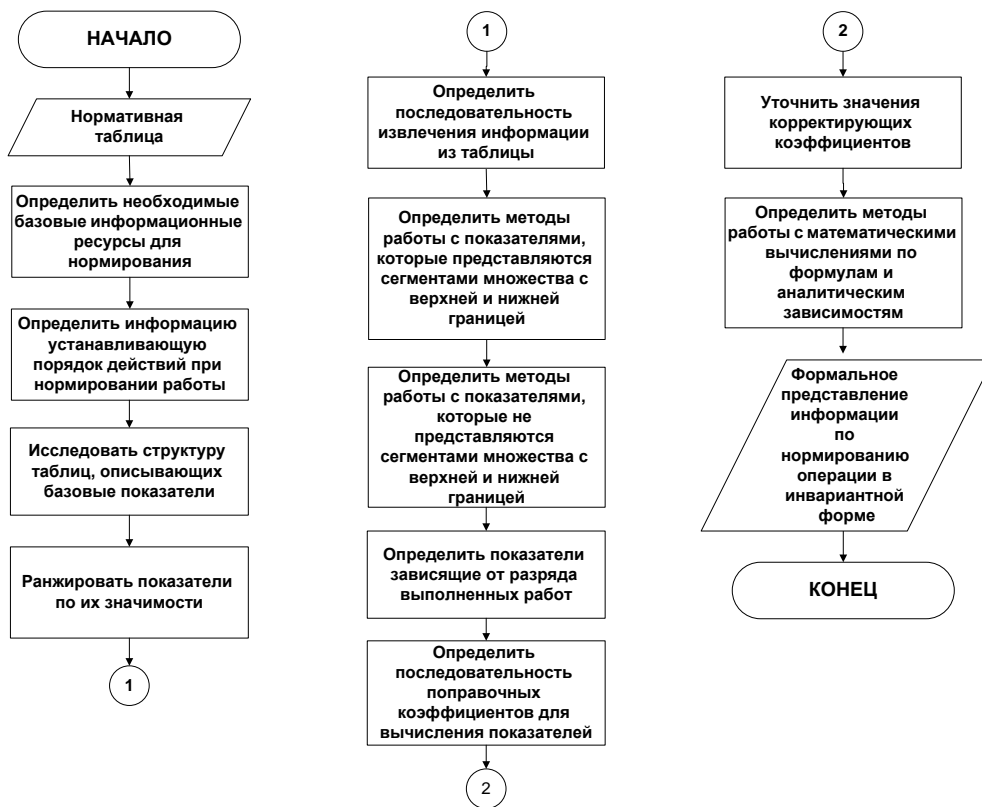


Рис. 6. Алгоритм методики формализации нормативных таблиц

Таблица 2

Преимущества и недостатки имеющихся методов и моделей трудоемкости

Метод	Преимущества	Недостатки
Системно-структурные	Наглядность, простота, визуализация при относительно небольшом количестве элементов системы. Низкие временные и стоимостные затраты.	Трудность интерпретации и наглядности при большом количестве причинно-следственных связей. Низкая точность. Не позволяет делать прогноз, не учитывает применение новых материалов.
Экстраполяционно-математические	Применимы как на макро, так и на микроуровне. Учитывают такие характеристики поведения технико-экономических систем как изменчивость (динамичность), противоречивость поведения, тенденция к ухудшению характеристик, подверженность воздействию окружающей среды.	Невозможность адекватного оценивания в условиях недостаточности информации или плохого её «качества». Трудность выбора оптимального количества факторов в модели. Часто наблюдается излишняя абстрактность и теоретизированность. Не учитывает применение новых материалов в производстве.

Таблица 3

Значения трудоёмкости изготовления детали из ПКМ соответствующего класса

Название класса	Трудоёмкость изготовления изделия, $T_{\text{база}i}$, н.-ч.
Конструкции без усиливающих и сотовых элементов ($i=1$)	$T_{\text{база}1} = X_{\text{база}1} S_{\text{осн.слоев}}^{\text{выкл}} = \left(\frac{0,066}{S_{\text{дет}}^2} + 34,63 S_{\text{дет}} - 20,853 S_{\text{дет}}^2 + \frac{25,93}{e^{S_{\text{дет}}}} \right) S_{\text{осн.слоев}}^{\text{выкл}}$
Конструкции с усиливающими и сотовыми элементами ($i=2$)	$T_{\text{база}2} = X_{\text{база}2} S_{\text{осн.слоев}}^{\text{выкл}} = \left(\frac{0,743}{S_{\text{дет}}} + 0,083 S_{\text{дет}}^2 + \frac{5,061}{e^{S_{\text{дет}}}} + \frac{6,328}{ Ln(S_{\text{дет}}) } \right) S_{\text{осн.слоев}}^{\text{выкл}}$

Трудоёмкость изготовления деталей из ПКМ может быть определена следующим образом:

$$T_{\text{и.пкм}} = T_{\text{з.пкм}} + T_{\text{м.о.пкм}}, \quad (13)$$

где $T_{\text{з.пкм}}$ – трудоёмкость процесса изготовления заготовок из ПКМ; $T_{\text{м.о.пкм}}$ – трудоёмкость механической обработки заготовок из ПКМ.

Трудоёмкость процесса изготовления заготовок ПКМ может быть определена как

$$T_{\text{з.пкм}} = T_{\text{база}i} k_{\text{ксл}} k_{\text{сл}} k_a, \quad (14)$$

где $T_{\text{база}i}$ – базовая трудоёмкость изготовления заготовок из ПКМ в зависимости от класса конструкции заготовки из ПКМ ($i = 1$ или 2 , табл. 3), представленный предприятием-изготовителем; $k_{\text{ксл}}$ – коэффициент, учитывающий уровень конструктивной сложности детали из ПКМ; $k_{\text{сл}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение сложности собственно конструкции ПКМ; k_a – коэффициент, учитывающий повышение уровня автоматизации технологических процессов изготовления деталей из ПКМ.

Функциональная зависимость базовой трудоёмкости 1 мм^2 площади выкладываемой поверхности с учетом количества основных слоев ($X_{\text{база}i}$) от площади наружной поверхности детали представленных классов конструкций заготовки ($S_{\text{дет}}$) определяет критерий новизны модели.

$$X_{\text{база}i} = f(S_{\text{дет}}). \quad (15)$$

Все детали из ПКМ соответственно были экспертно разделены на две группы. Процедура отбора факторов в уравнение представляла собой шаговую регрессию.

Построенная модель соответствует всем критериям адекватности, таким образом, можно утверждать, что при сохранении сложившихся закономерностей функционирования изучаемой системы прогнозируемая величина (трудоёмкость, рассчитанная по экономико-математической модели) достаточно точно описывает значения трудоёмкостей, рассчитанных по модели для ДСЕ из ПКМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В литературе, освещенной в публикации, представлено множество подходов оценки трудоёмкости изготовления изделий на разных этапах жизненного цикла продукции на промышленном предприятии. Их главным недостатком является абстрактность и теоретизированность, не учитывается применение новых материалов. В связи с этим, нами предлагается модель, которая позволяет провести прогноз трудоёмкости изготовления изделия из ПКМ (а именно узлов мотогондолы), непосредственно используя данные конструкторской и технической документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванов С. Г., Гузаиров М. Б., Кутин А. А. Инноватика. М.: Машиностроение, 2013. 839 с. [[S. G. Selivanov, M. B. Guzaïrov, A. A. Kutin, *Innovations*, (in Russian). Moscow: Mashinostroeniye, 2013.]]
2. Моргунов В. М. Экономико-математическое моделирование управление процессом обучения на производстве: автореферат дис. ... канд. экон. наук. М., 2012. [[V. M. Morgunov, "Economic-mathematical modeling of process control in the production of learning", (in Russian), synopsis, 2012.]]
3. Ицкович И. И., Михайлова Н. А. Прогнозирование трудоёмкости изготовления газотурбинного двигателя на основе классификатора статистических нормативов// *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 9 (35). С. 31–37. [[I. I. Itskovich, N. A. Mikhailova, "Forecasting the complexity of the manufacturing process of the gas turbine engine based on the classification of statistical standards", (in Russian), in *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 9 (35), pp. 31-37, 2006.]]
4. Махитко В. П., Сироткина И. Б., Шумчук Р. Н. Формирование трудоёмкости изготовления изделий при изменении конфигурации // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2009. С. 477–484. [[V. P. Mahitko, I. B. Sirotkina, R. N. Shumchuk, "Formation of the complexity of manufacturing products with configuration changes", (in Russian), in *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, pp. 477-484, 2009.]]
5. Праведников И. С. Ускоренные методы определения трудоёмкости деталей новых изделий // *Нефтегазовое дело* [Online]. 2005. № 1. URL: <http://www.ogbus.ru> (дата обращения 30.09.2014). [[I. S. Pravednikov, "Accelerated

methods for determining the complexity of the details of new products" [Online]. Available: <http://www.ogbus.ru>]]

б. **Барило И. И.** Методическое и информационное обеспечение нормирования трудозатрат в процессах механической обработки: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Кострома, 2004. [[I. I. Barilo, "Methods and information support work quota setting in machining processes", (in Russian), synopsis, 2004.]]

ОБАВТОРАХ

КАДЫРОВА Жанна Минифануровна, асп. каф. технологии машиностроения. Дипл. экон.-мат. (БашГУ, 2009). Готовит дис. о построении моделей трудоемкости изготовления авиационных гражданских ГТД в условиях кооперации.

ЮРЬЕВ Виктор Леонидович, проф. каф. технологии машиностроения. Д-р техн. наук (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. комплексной технологии сложнофасонных деталей ГТД при нестационарных условиях обработки.

METADATA

Title: Methods and models predicting the complexity of manufacturing aircraft gas turbine engines.

Authors: Zh. M. Kadyrova¹, V. L. Yuriev²

Affiliation:

¹ Ufa, Institute of Technology and the organization of production (NIIT), Russia.

² Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹ prep08@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 1 (67), pp. 29-36, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: As part of the methodology for determining the complexity of manufacturing gas turbine engines is invited to review the work of various authors on the complexity of the calculation.

Key words: complexity of manufacturing, mathematical model; polymer composite materials; learning curve.

About authors:

KADYROVA, Zhanna Minifanurovna, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Mechanical Engineering. Master of Mathematical Methods & Economics (BashGU, 2009).

YURIEV, Viktor Leonidovich, Prof., Dept. of Mechanical Engineering. Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2000).