

УДК 621.314.21

**В. А. Матухно**

### **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ НАВИТЫХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

*Аннотация.* Предложена методика оценки уровня технологичности навитых магнитных систем силовых трансформаторов. Технологический процесс изготовления навитых магнитных систем трансформаторов представлен в виде графоаналитической модели. Выявлены преимущества и недостатки нормативного метода калькулирования себестоимости и метода взвешенных сумм при определении технологической эффективности процесса производства навитых магнитных систем трансформаторов.

**В. А. Матухно**

### **МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ НАВИТИХ МАГНІТНИХ СИСТЕМ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

*Анотація.* Запропоновано методику оцінки рівня технологічності навитих магнітних систем силових трансформаторів. Технологічний процес виготовлення навитих магнітних систем трансформаторів представлено у вигляді графоаналітичної моделі. Виявлені переваги і недоліки нормативного методу калькуляції собівартості і методу зважених сум при визначенні технологічної ефективності процесу виробництва навитих магнітних систем трансформаторів.

**V. A. Matuhno**

### **METHODOLOGY TO EVALUATE THE MANUFACTURABILITY WOUND MAGNETIC SYSTEMS TRANSFORMERS**

*Abstract.* The method of estimation of level of technologicalness of the magnetic systems of power transformers is offered. The technological process of making of the magnetic systems of transformers is presented as a graphic-analytical model. Advantages and lacks of normative method of calculation of prime price and method of the self-weighted sums are exposed at determination of technological efficiency of process of production of the magnetic systems of transformers..

Экономическая стратегия развития любого предприятия подразумевает повышение качества выпускаемой продукции.

Качество – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Количественная характеристика свойств продукции, составляющих ее качество, называется показателем качества продукции.

В настоящее время признана классификация следующих десяти групп свойств и соответственно показателей: назначения, надежности, технологичности, стандартизации и унификации, эргономические, эстетические, патентно - правовые, экологические, безопасности [2].

В данной статье рассматривается подход к определению количественной оценки показателя технологичности изготовления навитых магнитных систем трансформаторов.

Показатель технологичности - комплексный показатель, учитывающий единичные производственно-технологические и конструктивно-технологические показатели [3].

Создание и внедрение в производство новых видов магнитных систем трансформаторов основано на прогрессивных конструктивных принципах с использованием новых материалов и передовой технологии [7].

Комплексный показатель технологичности определяет в целом технологический уровень производства, а также прогрессивность применяемых технических решений конструкций магнитных систем трансформаторов (новых или модернизированных).

При известных экономических показателях и условиях ценообразования показатель технологичности конструкции магнитной системы трансформатора можно определить с точки зрения трудоемкости, материалоемкости и полной себестоимости процесса производства. Такой подход принят в типовых нормативных документах по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции. Нормативный метод калькулирования себестоимости продукции в отечественной электротехнической промышленности [4], в частности в трансформаторостроении, аналогичен применяемой на Западе системе «стандарт-кост» («standart-cost»), которая состоит из стандартов (норм) на затраты материалов, труда, накладных расхо-

© Матухно В.А., 2011

дов и разработанных на их основе стандартных (нормативных) калькуляций [10].

Способы и условия производства навитых магнитных систем могут отличаться, подвергаться соответствующему изменению и дополнению в зависимости от их конструктивных особенностей [1].

Для наглядного представления (визуализации) технологического процесса изготовления навитых магнитных систем трансформаторов воспользуемся математическим аппаратом общей теории графов [8].

Графический образ технологических процессов позволяет математически смоделировать процедуру нахождения величины показателя технологичности процесса производства магнитной системы трансформатора.

Анализ нормативной калькуляции себестоимости любого трансформаторного устройства показывает, что себестоимость всей конструкции либо какого-то ее элемента, в нашем случае – магнитной системы, может быть выражена через показатели трудоемкости  $T$ , материалоемкости  $M$ , фондоемкости  $F$  производства.

На примере технологического процесса изготовления навитых магнитных систем трансформаторов построим графмодель данного процесса.

На рис.1 в форме графа представлен процесс изготовления магнитной системы трансформатора из навитых элементов.

Вершина  $a_0$  соответствует объему заготовительного материала (электротехническая сталь) из которого изготавливается магнитная система.

Вершины типа  $a_1, \dots, a_{n-1}$  соответствуют промежуточным состояниям конструкции магнитной системы в процессе последовательного превращения в готовую (окончательную) конструкцию магнитной системы трансформатора (вершина  $a_n$ ). Для экономической оценки технологического процесса изготовления магнитной системы можно использовать показатель затрат труда на осуществление перехода из состояния  $a_0$  (рулон электротехнической стали) в  $a_1$  (лента электротехнической стали заданной ширины);  $a_1$

– в  $a_2$  (навитой элемент магнитной системы); и т.д. – из  $a_{n-1}$  в  $a_n$ , т.е. удельную трудоемкость  $t_E$  на проведение технологической операции в стоимостном выражении.

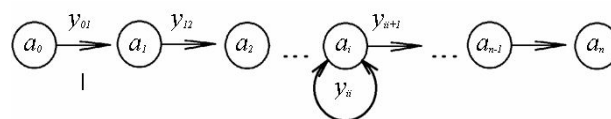


Рис.1. Модель технологического процесса изготовления магнитной системы трансформатора

Стрелки  $y_{ij}$  между вершинами соответствуют технологическим операциям, выполняемым в процессе изготовления (резка, намотка элементов магнитной системы и т.д.). Для их описания могут быть использованы удельные затраты на оборудование, необходимое для проведения конкретной операции изготовления  $f_{ij}$  (удельная операционная фондоемкость) в стоимостном выражении.

Петля  $y_{ii}$ , изображенная на рис.1, соответствует дополнительным технологическим операциям, выполняемыми в процессе изготовления, для придания заданных свойств элементам конструкций (например, обезжиривание стальной ленты, покрытие ленты лакокрасочными материалами, лазерная обработка и т.д.). Для стоимостной оценки дополнительных технологических операций могут быть использованы удельные нормы расхода необходимого материала в стоимостном выражении  $m''$ .

Использование в качестве оценочных удельных показателей материалоемкости и фондоемкости, вычисленных в стоимостном выражении, обеспечивает единый подход, взаимосвязь и сопоставимость результатов на всех этапах анализа уровня технологичности конструкции трансформатора.

Окончательные значения показателей материалоемкости  $M$  основного материала (электротехническая сталь), стоимости покупного полуфабриката  $M'$  (бандажная лента, стягивающие шпильки и т.п.), материалоемкости для дополнительных технологических операций  $M''$ , удельной трудоемкости  $T_{ij}$ , удельной фондоемкости  $F_{ij}$  для процесса изготовления магнитной системы определяются из следующих равенств:

$$m = a_0; m' = a'_0; M = m; M' = m', \quad (1)$$

$$m'' = y_{ii}, \text{ при } i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$M'' = \sum m'' = \sum_{i=1}^n y_{ii}, \quad (3)$$

$$t_{II} = a_i, \text{ при } i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$T_{II} = \sum t_{II} = \sum a_i, \text{ при } i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$f_{II} = y_{ij}, \text{ при } i = \overline{0, n-1}; j = \overline{1, n}, \quad (6)$$

$$F_{II} = \sum f_{II} = \sum_{i=0, j=1}^{n-1, n} y_{ij}. \quad (7)$$

Для модернизируемого производства значение коэффициента технологичности конструкции на этапе изготовления

$$K_{Ty_i}^u = 1 - \frac{\Delta f_u}{(\Delta m + N_t \cdot \Delta t - N_f \cdot \Delta f) \cdot T_n} = 1 - \frac{\Delta y_{ij}}{(\Delta a_0 + N_t \cdot \Delta a_i - N_f \cdot \Delta y_{ij}) \cdot T_n}, \quad (8)$$

где  $\Delta m, \Delta t, \Delta f$  – изменения показателей операционной материало-трудо- и фондоемкости (соответственно) при переходе от базового к варианту модернизированного производства, грн.;  $N_t$  – коэффициент, учитывающий связь трудоемкости изготовления с себестоимостью конструкции магнитной системы;  $N_f$  – коэффициент, учитывающий связь первоначальной стоимости основных фондов с себестоимостью конструкции магнитной системы;  $T_n$  – принятый срок окупаемости инвестиционных затрат, лет.

При недостаточной информации о стоимостных оценках каких-либо технологических операций показатель технологичности конструкции магнитной системы трансформатора можно определить по методу «взвешенных сумм» согласно выражению

$$F_k(a_k) = \sum_{i=1}^n \alpha_{ik} q_i, \quad (9)$$

где  $F_k(a_k)$  – обобщенный показатель (критерий) технологичности изготовления магнитной системы трансформатора  $a_k$ ;  $\alpha_{ik}$  – дифференциальный коэффициент технологичности по отдельному показателю  $i$  (шихтовка, навивка, резка, шлифовка и т.д.);  $q_i$  – нормированный коэффициент веса по сравнению с другими показателями;  $n$  – ко-

личество показателей, по которым производится сравнение.

Для оценки сложности («веса») какой-либо технологической операции необходимо составить таблицу приоритетов всех технологических операций. При составлении таблицы учитывают мнения (данные опроса) достаточного количества специалистов-технологов, связанных непосредственно с производственным процессом изготовления трансформаторов (метод экспертных оценок).

Величины приоритетов технологических операций задаются в виде целых чисел в соответствии со сложностью выполнения той или иной технологической операции. Более сложной технологической операции соответствует большее число  $Q_i$ . Для получения коэффициентов веса параметра по сравнению с другими параметрами ( $q_i$ ) значение  $Q_i$  нормируется

$$q_i = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}. \quad (10)$$

Нормированный коэффициент  $q_i$  показывает «вес»  $i$ -ой технологической операции среди остальных.

Таким образом, элементом таблицы (матрицы) является оценка приоритета  $\mu_{ij}$  технологической операции  $i$  по сравнению с технологической операцией  $j$ .

Используя данные таблицы (матрицы) приоритетов, можно определить относительную сложность отдельных технологических операций в общем комплексе работ из следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{q_k}{q_i} &= \frac{\beta_k}{\beta_i}; \\ i, k &= 1 \dots n; i \neq k; \\ \sum_{k=1}^n q_k &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где  $q_k$  – сложность технологической операции;  $n$  – количество технологических операций;  $\beta_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) – сумма оценок (приоритетов) для каждой технологической операции.

Кроме расчета показателя технологичности, правильному определению преимуществ и недостатков магнитных систем трансформаторов, способствует также анализ других конструктивно-технологических показателей конструкции.

Рассматривались конструкции трансформаторов с ленточными магнитопроводами, представленные на рис.2. Выпуск конструкций а,в,г,д промышленно освоен трансформаторостроительными заводами. Конструкция (рис.2,б) апробируется для внедрения в производство [6]. Конструкция (рис.2,е) рекомендуется автором к промышленному производству с учетом характерных для данной конструкции преимуществ [5,9].

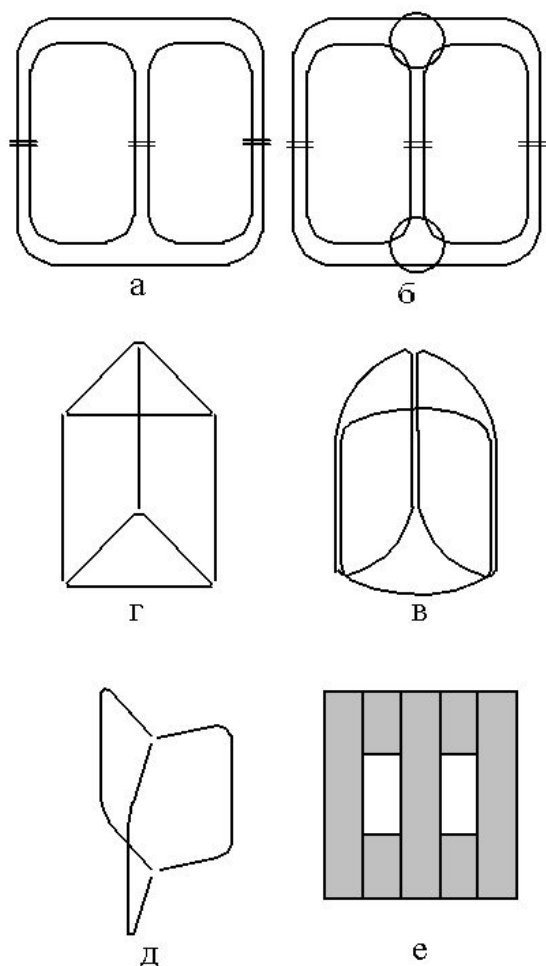


Рис.2. Виды конструкций магнитных систем с навитыми элементами

В табл.1 приведены конструктивно-технологические показатели процесса производства магнитных систем трансформаторов, содержащих навитые элементы. При их со-

поставительном анализе было отдано предпочтение конструкции магнитной системы трансформатора, показанной рис.2,е по условию эффективности технологического процесса производства.

1. Конструктивно-технологические показатели процесса производства трансформаторов

Показатель	Конструкции, изображенные на рис.2					
	а	б	в	г	д	е
Число резов	3	3	-	3	4	2
Число стыков	3	5	-	6	6	8
Минимальные отходы стали	+	±	+	±	+	+
Простота изготовления	+	±	+	±	+	+
Обработка стыковых поверхностей	+	+	-	-	+	-
Простота сборки и разборки	+	±	+	±	±	+
Затраты ручного труда	±	±	+	±	±	±
Минимум технологической оснастки	+	+	+	+	+	+
Дополнительные технологические операции	+	+	-	-	+	-
Простота намотки и установки обмоток	+	+	-	+	-	+
Наличие короткого замыкания контуров	-	+	-	+	-	-
Геометрическая симметрия	-	-	+	+	+	-
Тип стыка	пр	пр	-	пр	кос	пр
Простота креплений для образования остова	+	+	+	±	-	+
Идентичность элементов	-	-	+	±	+	+
Наличие 3-й гармоники в потоке	+	±	+	в ярме	-	-

Ниже, на основании вышеизложенных положений, приведен пример определения показателя технологичности изготовления магнитных систем, показанных на рис. 2,а и 2,е.

**Пример.** Согласно технологическому процессу производства трансформатора с навитыми элементами (рис.1), графическая модель изготовления магнитной системы (рис.2,а) имеет вид, показанный на рис.3.

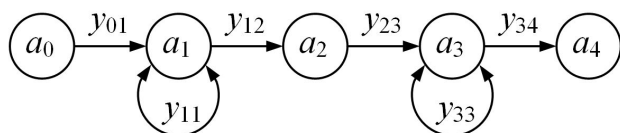


Рис.3. Графическая модель технологического процесса изготовления магнитной системы трансформатора, показанной на рис.2,а

Вершина  $a_0$  соответствует начальному состоянию конструкции магнитной системы (рулон электротехнической стали);  $a_1$  – лента электротехнической стали заданной ширины;  $a_2$  – конструктивные элементы, полученные в результате намотки (стержни ярма);  $a_3$  – конструктивные элементы после поперечной резки;  $a_4$  – конструкция магнитной системы после предварительной сборки.

Технологические операции показаны стрелками:  $y_{01}$  – продольная резка рулона электротехнической стали;  $y_{12}$  – намотка конструктивных элементов;  $y_{23}$  – поперечная резка конструктивных элементов ( после намотки);  $y_{34}$  – предварительная сборка магнитной системы.

Петля  $y_{11}$  при вершине соответствует технологическим процессам обезжиривания стальной ленты и дополнительным технологическим операциям по обработке ленты электротехнической стали. Петля  $y_{33}$  соответствует процессам шлифования разрезанных поверхностей магнитопровода и зачистки заусенец после шлифования.

Вид графической модели для конструкции магнитной системы (рис.2,е) аналогичен рис.3. Отличие лишь в отсутствии петли  $y_{33}$  при вершине  $a_3$ .

Для оценки сложности («веса») технологических операций составим таблицу приоритетов.

Экспертам предлагалось ввести приоритеты технологических операций в следующей пропорции: 10:1 – подавляющая сложность осуществления технологической операции  $i$  по сравнению с технологической операцией  $j$ ; 5:1 – значительно большая сложность; 2:1 – большая сложность; 1:1 – равная сложность. Если, например технологическая операция  $i$  имеет значительно большую сложность по сравнению с операцией  $j$ , т.е.  $\mu=5:1$ , то элемент  $\mu_{ij}$  таблицы (матрицы) приоритетов равен 5, а элемент равен 1.

Эту информацию записываем в табл.2.

Для определения весовых коэффициентов  $q_k$  используем систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} q_2/q_1 &= 7/50; q_3/q_1 = 7/50; \\ q_4/q_1 &= 25/50; q_5/q_1 = 17/50; \\ q_6/q_1 &= 15/50; q_7/q_1 = 15/50; \\ q_8/q_1 &= 17/50; \\ q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 + q_8 &= 1 \end{aligned} \right\} (12)$$

Откуда

$$\begin{aligned} q_1 &= 0,327; q_2 = 0,046; q_3 = 0,046; \\ q_4 &= 0,164; q_5 = 0,111; q_6 = 0,098; \\ q_7 &= 0,098; q_8 = 0,111. \end{aligned}$$

Функция показателя технологичности-конструкции, представленной на рис.2,а, имеет вид:

$$\begin{aligned} F_k(a_{ik}) &= 0,327a_{1k} + 0,046a_{2k} + \\ &0,046a_{3k} + 0,164a_{4k} + 0,111a_{5k} + \\ &0,098a_{6k} + 0,098a_{7k} + 0,111a_{8k}. \end{aligned} \quad (13)$$

Аналогично можно получить выражение для функции показателя технологичности-конструкции магнитной системы, представленной на рис.2,е. В связи с тем, что технологический процесс изготовления данной конструкции не включает в себя технологические операции по шлифованию торцевых разрезанных поверхностей магнитопровода и зачистке заусенец после шлифования, то элементы  $\mu_{67}$  и  $\mu_{76}$  таблицы приоритетов равны нулю.

Весовые коэффициенты  $q_k$  технологических операций в общем объеме работ получаются следующими:

$$q_1 = 0,331; q_2 = 0,046; q_3 = 0,046 ;$$

$$q_4 = 0,166; q_5 = 0,113; q_6 = 0,093 ;$$

$$q_7 = 0,093; q_8 = 0,113 .$$

При этом функция показателя технологичности конструкции, представленной на рис.2,е,

$$F_k(a_{ik}) = 0,331a_{1k} + 0,046a_{2k} +$$

$$+ 0,046a_{3k} + 0,166a_{4k} +$$

$$+ 0,113a_{5k} + 0,113a_{8k} .$$
(14)

Согласно типовым нормам времени на изготовление, капитальный, текущий ремонт электроэнергетического оборудования, а также данным различных информационно-аналитических сайтов в сети Internet удельные стоимости технологических операций приняты следующими: продольная резка рулона электротехнической стали 6 грн/м<sup>2</sup>; обезжиривание ленты и дополнительная об-

работка электротехнической стали 0,6 грн/м<sup>2</sup>; намотка элементов магнитопровода – 3,5 грн/м<sup>2</sup>; поперечная резка элементов конструкции и предварительная сборка 2,0 грн/м<sup>2</sup>, шлифование разрезанных поверхностей магнитопровода и зачистка заусенец после шлифования 1,5 грн/м<sup>2</sup>.

При таких экономических нормативах показатели технологичности изготовления конструкций магнитных систем (рис.2,а,е) соответственно равны  $F_{3a}=3,33$  и  $F_{3e}=3,02$ .

Чем больше значение показателя технологичности  $F$ , тем сложнее процесс изготовления. Таким образом, процесс изготовления конструкции магнитной системы (рис.2,а) приблизительно на 10 % сложнее, чем конструкции (рис.2,е)

## 2. Приоритеты технологических операций

Технологические операции		Продольная резка рулона	Обезжиривание ленты	Дополнительная обработка ленты электротехнической стали	Намотка элементов магнитопровода	Поперечная резка элементов	Шлифование разрезанных поверхностей магнитопровода	Зачистка заусенец после шлифовки	Предварительная сборка магнитной системы	Сумма оценок по строкам $\beta_k$
		<b>i=1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	
<b>j=1</b>	Продольная резка рулона	0	10	10	5	5	10	5	5	50
<b>2</b>	Обезжиривание ленты	1	0	1	1	1	1	1	1	7
<b>3</b>	Покрывание ленты суспензией	1	1	0	1	1	1	1	1	7
<b>4</b>	Намотка элементов магнитопровода	1	5	5	0	2	5	5	2	25
<b>5</b>	Поперечная резка элементов	1	2	2	1	0	5	5	1	17
<b>6</b>	Шлифование разрезанных поверхностей магнитопровода	1	5	5	1	1	0	1	1	15
<b>7</b>	Зачистка заусенец после шлифования	1	5	5	1	1	1	0	1	15
<b>8</b>	Предварительная сборка магнитной системы	1	5	5	1	1	2	2	0	17

### Выводы

1. На основе графоаналитической модели технологического процесса производства навитых магнитных систем трансформаторов, с использованием нормативного метода калькулирования себестоимости и метода взвешенных сумм, можно определить технологическую эффективность процесса их производства.

2. Величину показателя технологичности необходимо учитывать в математической модели функции цели (критерии оптимальности) при проведении структурно-параметрической оптимизации трансформаторов различного конструктивного исполнения.

### Список использованной литературы

1. Аренков А.Б. Изготовление трансформаторов с ленточными магнитопроводами / А.Б.Аренков, А.К.Климов, Ю.Н.Липатов. – Л.: Судостроение, 1976. – 232 с.

2. ГОСТ 22851-77. Выбор номенклатуры показателей качества промышленной продукции. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 11с.

3. ГОСТ 14.205-83. Технологичность конструкции изделий. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 22с.

4. Николаева С.А. Принципы формирования и калькулирования себестоимости / С.А.Николаева – М.: Аналитика-Пресс, 1997. – 144 с.

5. Патент на корисну модель №44772. Матухно В.А., В.П. Чайковський Магнітопровід. Бюл.№19 12.10.2009 H01F 27/24//.

6. Новые конструкции трехфазных трансформаторов с ленточными магнитопроводами /И.В.Пентегов, С.В. Рымар, А.В.Лавренюк, О.И. Петриенко//Труды конф. «Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика». – Харьков: -2002.- №14.-с.86-97

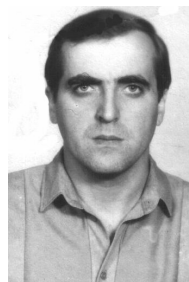
7. Пуйло Г.В. Современные тенденции совершенствования распределительных трансформаторов /Пуйло Г.В., Кузьменко И.С., Тонгалюк В.В // Электротехн. та електромех. – 2008.–Вип.2. – С. 48-52.

8. Харари Ф. Теория графов / Харари Ф. – М.: Мир, 1973.

9. Чайковский В.П. Перспективы применения конструкций магнитных систем трансформаторов из витых элементов / В.П. Чайковский, В.А. Матухно, С.А. Игнатенко // Электромашинобуд. та електрообладн. — 2007. – Вип. 68. – С. 48-51.

10. William M. Flanagan. Handbook of transformer design and applications. Boston.: McGraw Hill, 1993, 232с.

Получено 30.03.2011



Матухно  
Валентин Анатольевич,  
старший преподаватель  
кафедры электрических машин  
Одесского нац.  
политехн. уни-та  
тел. (048) 734-86-81