

УДК 621. 315. 611

КРИТЕРИЙ СОРАЗМЕРНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

РУСТАМОВ Н.Ю., ПИРИЕВА Н.М.

Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия

В статье определяется критерий соразмерности, позволяющий анализировать влияние параметров трансформатора на его стоимость и к.п.д., оценивать совершенство выполненных конструкций и намечать пути их удешевления. Показано, что обобщенные условия соразмерности хорошо подтверждаются реальными конструкциями.

Задача о выборе оптимальной геометрии трансформаторов и электрических машин составлено давно и уже в значительной мере разрешена методами общих исследований и путем непосредственных расчетов. Однако, проблема оптимальных соразмерностей не утратило своего значения. Усовершенствование известных материалов и появление материалов с новыми свойствами, изменение технико-экономической конъюнктуры и множество других факторов, заставляют пересматривать старые конструкции в поисках более совершенных решений.

В этом случае нужно располагать общим методом анализа соразмерностей с тем, чтобы сознательно идти к поставленной цели.

Вопросу о выборе соразмерности трансформатора – этого простейшего электромагнитного аппарата – посвящено много работ, авторы которых ориентировались на самые разнообразные критерии.

Можно указать несколько характерных решений задач об оптимальном трансформаторе, предложенных ранее.

Н.Bohle [1], положив в основу условие минимума потерь при заданной стоимости активных материалов, с помощью весьма простых и наглядных кривых и соотношений находит основные размеры и нагрузки трансформатора «В» и «Δ» (индукцию и плотность тока).

Г.Н.Петров [2], принимает за основу условие минимума годовых потерь трансформатора при заданных нагрузках «В» и «Δ» и находит его основные соразмерности, параллельно анализируя вопрос о нарушении соразмерности Видмара.

La Cour [3] кладет в основу расчета минимум эксплуатационной стоимости трансформации, т.е. сумму первоначальной стоимости трансформатора и потерь за время эксплуатации, находит размеры трансформатора с помощью большого количества кривых, соответствующих случаю свободного выбора нагрузок «В» и «Δ», а так же случаям предельных значений нагрузок «В» и «Δ» при постоянном и переменном коэффициенте заполнения окна.

На основе этого же критерия Н.Ф.Байдак [6], используя ряд кривых, характеризующих коэффициенты заполнения и другие параметры трансформаторов, переходит к аналогичным результатам.

Изложенные методы не учитывают стоимости охлаждающего трансформатора - как масло.

Видмар в своих последних работах [4] исходя из минимальной стоимости трансформации, приходит к условию экономичного трансформатора, для которого стоимость потерь за время эксплуатации, включая стоимость охлаждающего устройства должна быть равна трехкратной стоимости активной части трансформатора. Взяв за основу этот критерий, Видмар исследует основные соразмерности трансформаторов, сохраняя основные, ранее полученные им условия соразмерности.

Наконец, А.В.Трамбицкий [7], принимая основные соразмерности (равенство весов стержней и ярем, равенство стоимости меди и стали), задаваясь нагрузками «В» и «Д» и учитывая ряд соотношений, установленных практикой, находит все размеры трансформатора.

Можно указать и другие методы расчета, однако, преимущество того или другого способа в значительной мере определяется индивидуальными привычками и вкусами привычками и вкусами проектирующего. Учитывая это обстоятельство, нам представляется целесообразным, не развив нового метода расчета, дать метод оценки трансформатора с точки зрения приближения его к оптимальному, независимо от того, каким путем трансформатор был спроектирован. Этой целью и служит предлагаемый ниже «критерий соразмерности».

Очень часто при анализе соразмерностей трансформаторов и электрических машин смешивают и рассматривают совместно два вопроса:

1. Оптимальные соразмерности, т.е. соотношение размеров и потерь отдельных элементов трансформатора или машины;
2. Оптимальные нагрузки материала «В» и «Д», определяющие степень использования конструкции и «уровень потерь» данного ряда.

Правда, эти вопросы связаны между собой, хотя бы благодаря влиянию насыщения стали, при котором возникает необходимость отступление от оптимальных соразмерностей. Однако, это обстоятельство является второстепенным фактором и должно учитываться лишь в качестве поправки.

Ряд работ посвящен вопросу о установлении наиболее выгодного уровня потерь трансформаторов и электрических машин. Мы его рассматривать не будем, и исследуем соразмерность трансформаторов, безотносительно к целесообразной степени использования их материалов.

Чтобы отвлечься от нагрузок материала «В» и «Д» и судить о совершенстве конструкции с точки зрения ее соразмерностей, воспользуемся понятиями о «приведенном весе» и «приведенной стоимости». Поясним их сущность.

Рассмотрим ряд трансформаторов, подчиняющийся закономерностям:

$$G \equiv P^x, \quad C \equiv P^x, \quad p = P^{-y} \quad (a)$$

где G – вес активного материала; C -стоимость активного материала; p - потери трансформатора, выраженные в процентах; P -мощность трансформатора; x и y - показатели степени.

Можно доказать [5], что для любой модели этого ряда справедливы следующие выражения:

$$G \cdot p^{xy} = const = G'; \quad (1)$$

$$C \cdot p^{xy} = const = C'; \quad (2)$$

Величину G' назовем «приведенным весом», величину C' назовем «приведенной стоимостью».

Оказывается, что значения G' и C' определяются лишь геометрическими соотношениями моделей и не зависят ни от абсолютных размеров модели, ни от ее мощности, ни от электромагнитных нагрузок материала «В» и «Д» (при условии $B=\Delta$).

Следовательно, если найдены геометрические соотношения, обеспечивающие минимальное значение приведенной стоимости ряда C ; то на основании (2) стоимость C любой модели при заданном к.п.д. будет минимальной по сравнению с моделями, имеющие иные соразмерности. Которые, модели при заданной стоимости будут обладать максимальным к.п.д. по сравнению с к.п.д. других моделей, имеющих иную геометрию.

Это свойство приведенного веса и приведенной стоимости дает возможность анализировать геометрические соразмерности трансформаторов и электрических машин, определять их стоимость и к.п. д.

Выражения (1) и (2) предполагают, что все модели имеют одинаковое соотношение потерь в меди и стали $\xi = \frac{P_M}{P_p}$. Однако, у реальных трансформаторов, даже

принадлежащих к одной и той же серии, « ξ » может быть различным. Сравнивая реальные конструкции, нужно привести все модели к одинаковому значению $\xi = \xi_0$. В этом случае приведенная стоимость равна

$$C'_{\xi_0} = C \cdot \left(p \cdot \frac{1 + \xi_0}{\xi_0^{1/2}} \cdot \frac{\xi^{1/2}}{1 + \xi} \right)^{x/y} \quad (2a)$$

На рис. 1 дана приведенная стоимость силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов МТЗ при значениях высшего напряжения 10 и 35кВ, определенная согласно (2a). При расчете, стоимость 1 кг активной стали, была принята равной 1, стоимость 1 кг меди - равной 3,5. Показатель степени принят $x/y=3$, $\xi=3$.

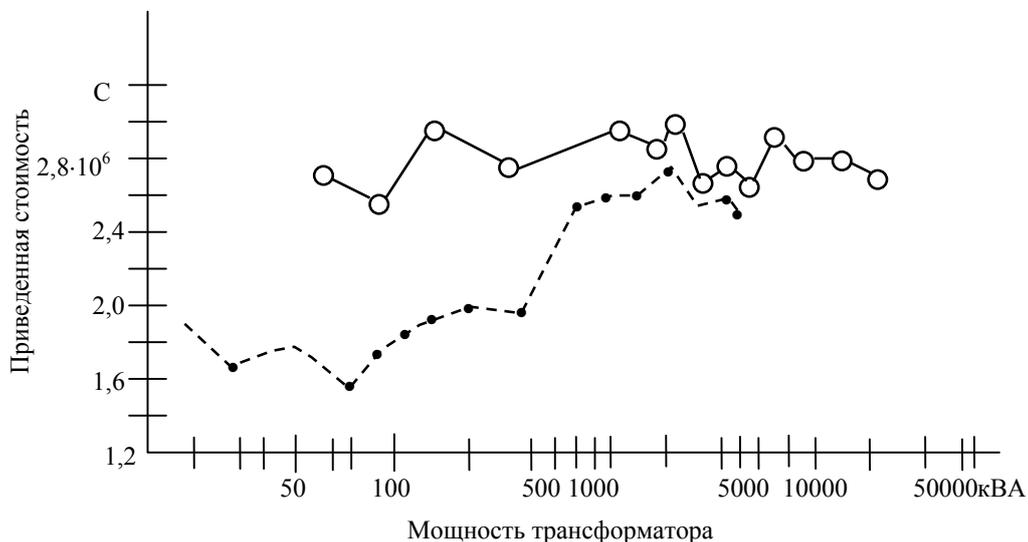


Рис.1. Приведенная стоимость силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторов МТЗ

Если все трансформаторы построены одинаково закономерно и отношение x/y выбрано правильно, то приведенная стоимость серии должна быть представлена в виде горизонтальной прямой, если же значение x/y , принятое нами при расчете не вполне соответствует истинному, то получается главная наклонная кривая. Между тем рис. 1 обнаруживает скачки приведенной стоимости смежных типов достигающие 20%. Это

значит, что серия трансформаторов МТЗ спроектирована недостаточно закономерно и что отдельные трансформаторы, будучи выполнены с одинаковым к.п. д., отличались бы по стоимости на 20% благодаря тому, что некоторые из них обладают неблагоприятными соотношениями.

Таким образом, приведенная стоимость, найденная согласно (2) или (2а), позволяет оценить трансформаторы по суммарному (интегральному) эффекту и выявить неудачные модели. Однако выражение (2) не дает возможность установить, в силу каких причин соразмерность одной из моделей лучше, чем другой. Пути для решения подобного вопроса можно найти, исследовав понятие «критерий соразмерности».

Задаваясь потерями в меди и в стали P_M и $P_{ст}$, можно легко найти плотность тока « Δ » и индукцию в стержне « B », выразив их через цены, стоимости и удельные потери. Отсюда найдем мощность трансформатора

$$P = A \cdot f \cdot S_M \cdot S_{ст} \cdot \Delta \cdot B, \quad (3)$$

где f - частота сети; A – постоянная.

Потери трансформатора, выраженные в процентах

$$p = \frac{100 \cdot (P_M + P_{ст})}{P} \quad (4)$$

Приведенная стоимость трансформатора

$$C' = C \cdot p^{x/y}. \quad (5)$$

Пологая для упрощения $P_M = P_{ст} = 0,5$, вспомнив, что $C = 1$ и приняв $x/y = 3$, подставим все это в выражение приведенной стоимости (5).

Чтобы проанализировать трансформатор, рассчитанный по тому или иному методу, следует разбить его на части, и приняв полную стоимость активных материалов за единицу, выразить стоимость его частей в долях единицы. В случае ступенчатого стержня нужно преобразовать конфигурацию его сечения, построив прямоугольник, с шириной a_c или $a_c/2$, длину которого и принять за длину (толщину) пакета « L » (рис.2).

При круглых катушках такое преобразование дает:

1. для квадратного стержня (рис.2 а) $L = a_c$, $d_0 = 1,41 \cdot a_c$, $L = 0,707 \cdot d_0$;

2. для крестообразного стержня (рис.2 б) $L = 0,852 \cdot a_c$, $d_0 = 1,175 \cdot a_c$, $L = 0,725 \cdot d_0$;

3. для стержня с одной ступенькой (рис. 2 в) $L = 0,815 \cdot a_c$, $d_0 = 1,105 \cdot a_c$, $L = 0,738 \cdot d_0$

где d_0 - диаметр описанной окружности.

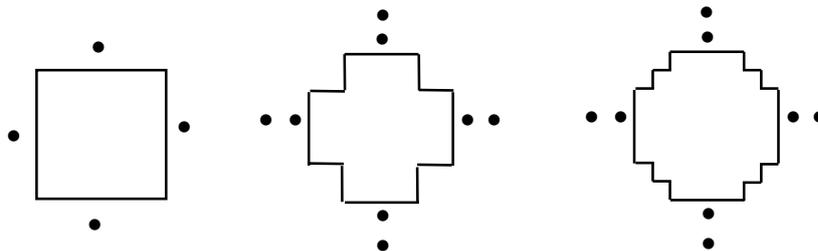


Рис.2. К анализу трансформаторов с помощью критерия соразмерности.

Медь, лежащая между линиями « aa » и « bb », следует считать принадлежащей ядру ($C_{мя}$), а медь вне этих линий принадлежащей лобовым частям обмоток (C_0). Отсюда можно найти

$$v = \frac{C_{мя} \cdot H}{C_{ст} \cdot H_M} \quad (6)$$

Далее нужно определить остальные коэффициенты.

Критерий соразмерности позволяет решать вопросы технико-экономического характера путем изменения любого параметра в выражении (5), влияющего на приведенную стоимость, которая пропорциональна действительной стоимости трансформатора при заданном к.п.д.

Укажем некоторые возможности использования критерия соразмерности.

Выражение (5) показывает, что изменение удельных потерь P_M и P_{CT} изменяет приведенную стоимость трансформатора пропорционально степени 1,5, а изменение цен материалов « c_M » и « c_{CT} » и коэффициент изоляции $m_{из}$ пропорционально степени 0,5. В частности, отсюда видно, что при рациональной конструкции трансформатора с применением стали уменьшаются удельные потери стали P_{CT} на 10%. А цена стали при этом c_{CT} должна возрасти менее, чем на 37%, при уменьшении P_{CT} на 20% c_{CT} должна возрасти менее, чем на 95%, и т.д.

Критерий соразмерности позволяет устанавливать влияние размеров трансформатора и коэффициентов заполнения на его стоимость. Он показывает, в частности, что влияние на стоимость трансформатора коэффициентов заполнения окна f_m (по оси) и f_b (по ширине) не равнозначно, и оно зависит от типа трансформатора.

Критерий соразмерности, взятый изолированно от условий соразмерности, не указывает оптимальные соотношения трансформатора, но он оказывает существенную помощь при анализе соразмерностей трансформатора и выборе общего направления проектирования в условиях изменяющейся технико-экономической конъюнктуры. В частности он позволяет установить количественное влияние отклонения от любого из условий соразмерности, утолщения ярма, формы катушек, влияние насыщения стали на геометрию, стоимость и к.п.д. трансформатора.

Коэффициенты E и F находят по таблице

Тип трансформатора	Значение E	Значение Φ	
		Способ использования трансформатора	
		в трехфазной сети	в однофазной сети
Трехфазный стержневой	$E = \frac{4 \nu k_c}{3 f_b k_m} + 2$	1	-
Трехфазный броневой	$E = \frac{1 \nu k_c}{3 f_b k_m} + \frac{1}{3}$	8	-
Однофазный стержневой с обмотками на одном и на двух стержнях	$E = \frac{1 \nu k_c}{2 f_b k_m} + 1$	8	2,67
Однофазный броневой	$E = \frac{1 \nu k_c}{2 f_b k_m} + \frac{1}{2}$	8	2,67

1. *H.Bohle.Be.* Traqzur Berechnung von Transformatoren, ETZ, Н.9, 1925 year.

2. *Г.Н.Петров.* Распределение потерь и стоимости в активном материале трансформаторов. М.; ВЭТЭ, № 11, 1928 г. Сборник «Электротехнические машины минимального веса» АН СССР. 1940 г.

3. *La Cour*. Beitrag zur Vorausberechnung der günstigsten Dimensionen von elektrischen, Transformatoren und mashinen, 1933.

4. *М.Видмар*. Дер купферарме Трансформатор, 1935.

5. *В.А.Трапезников*. «О приведенном весе и стоимости в электромашиностроении» М: Электричество, №11, 1935 г.

6. *Н.Ф.Байдак*. «Рациональные методы проектирования электрических машин» М.: Часть 1. 1937 г.

7. *А.В.Трамбицкий*. Расчет трансформаторов. М: ОНТИ. 1938 г.

8. *В.А.Трапезников*. «Обобщенные условия соразмерности трансформаторов электрических машин» М.: Электричество. №2, 1946 г.

9. *Н.И.Булгаков*. «Геометрия трансформатора минимальной стоимости» М: МЭИ.1947 г.

10. *Н.Ю.Рустамов, А.В. Алиева*. Исследование теплового режима сухих трансформаторов» Баку, Тематический сборник научных трудов, 1982 г.

TRANSFORMATORLARIN MÜTƏNASİBLİK KRİTERİYALARI

RÜSTƏMOV N.Y., PİRİYEVƏ N.M.

Məqalədə transformatorların parametrlərinin, onun dəyərinə və f.i.ə.-na təsirini təhlil etməyə, yerinə yetirilən konstruksiyaların müasir olunmasını qiymətləndirməyi və onların ucuz başa gəlməsi yollarını müəyyən etməyə imkan verən mütənasiblik kriteriyaları təyin edilmişdir.

CRITERIA OF HARMONY OF TRANSFORMERS

RUSTAMOV N.Y., PIRIYEVA N.M.

In article the criterion of the harmony is defined, allowing analyze influence of parameters of the transformer on his cost and efficiency, to estimate perfection of the executed designs and to plan ways of their reduction in price.