

mls 6
A-25

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

Томский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт имени С.М.Кирова

На правах рукописи

В.А. З О Р И Н

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ
ТРАНСФОРМАТОРОВ I И 2 ГАБАРИТОВ

(230 - Электрические машины)

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск - 1967 г.

В В Е Д Е Н И Е

Директивами XXIII съезда КПСС запланировано увеличение производства электроэнергии за 1966-1970 гг. до 830-850 млрд. квт.ч. в год, для чего предусматривается ввести за пятилетие 64-66 млн. квт новых энерго мощностей. Это позволяет ожидать выпуск новых трансформаторов за пятилетку суммарной мощностью примерно 650 млн. ква. Такие огромные цифры заставляют снова и снова заниматься проблемой всех скрытых резервов в сфере производства и проектирования трансформаторов. Член - корреспондент АН СССР Г.Н.Петров писал, что в современных условиях "исключительную актуальность приобретает рациональное проектирование серийных трансформаторов ... Устранение каждого киловатта потерь в трансформаторе, экономия каждого килограмма активных и конструктивных материалов, умноженные на огромное количество трансформаторов, ежегодно выпускаемых нашими заводами, должны принести значительный народнохозяйственный эффект.

Основные задачи советских трансформаторостроителей заключаются в том, чтобы обеспечить проектирование серий трансформаторов на глубоко продуманной технико-экономической основе ... " X)

Выпускаемые в большом количестве трансформаторы, работающие в распределительных сетях, потребляют значительную долю активных материалов, используемых в трансформаторостроении, на них приходится большая часть потерь энергии при трансформации.

Вопросам рационального проектирования таких трансформаторов и посвящена реферируемая диссертационная работа, выполненная на кафедре "Электрические станции" Томского политехнического института.

Перед автором была поставлена задача: распространить разработанный под руководством профессора И.Д.Кутявина метод технико-экономических исследований мощных силовых трансформаторов на трансформаторы I и 2 габаритов и исследовать влияние изменения тех или иных исходных ^{данных} расчета, в первую очередь, на величину минималь-

X) Петров Г.Н., Задачи отечественного трансформаторостроения, Вестник электропромышленности, 1963, № 4.

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР

ных расчетных затрат и оптимальную геометрию, а также на весовые и энергетические показатели трансформатора.

Общий объем работы 206 страниц машинописи, из них 150 страниц основного текста с 23 таблицами, иллюстрируемого 64 рисунками на отдельных вклейках. Список литературы содержит 185 наименований.

Основное содержание работы

В первой главе дается обзор литературы по теории расчета трансформаторов. Проводится критический анализ наиболее показательных методов за последние полвека, отмечаются их достоинства и недостатки.

Целая группа из рассмотренных методов при выборе оптимального варианта стремится удовлетворить только поставленные технические условия: методы А.В.Трамбицкого, Р.Рихтера, Л.М.Питровского. Другие, наоборот, учитывают в расчете только мощность трансформатора: - Н.Ф.Байдак, С.В. *Bălă*. Уравнения теплового баланса обмоток в качестве технического ограничения используют только три метода: - В.В.Яворского, К.К.Балашова, С. *Apetrii*.

Критерием оптимальности по большинству общеизвестных методов служит минимальная стоимость трансформатора (активных материалов). При этом стоимость потерь либо не учитывают вообще, либо учитывают, задаваясь из тех или иных соображений величиной потерь до расчета (Н.И.Булгаков, И.М.Постников, И.В.Нентегов, Ал.Дачев, П. Петров, П.Кольковский и Х. Кукушев и др.).

Технико-экономический подход к расчету трансформаторов лежит в основе шести методов: *J. Poroda*, *B. Wdowiak'a*, К.К.Балашова, С. *Apetrii'a*, И.М.Тихомирова и метод, разработанный для трансформаторов большой мощности группой авторов под руководством проф. И.Д.Кутявина. Сущность последнего метода и распространение его на трансформаторы 1 и 2 габаритов приводится в следующей главе.

Едва ли не все из анализируемых методов построены на нахождении основных размеров магнитопровода в предположении, что этим уже определены размеры обмоток и их размещаемость в окне обеспечена. Однако известно, что даже при постоянстве диаметра и высоты стержня можно найти наиболее выгодные размеры провода, определяющие оптимальную ширину окна.

Можно считать общепризнанным, что для широких технико-экономических исследований, связанных с выбором "оптимального трансформатора", целесообразно пользоваться переменным от варианта к варианту коэффициентом заполнения площади окна активным проволочным металлом. Между тем во всех методах, использующих этот, или ему подобные коэффициенты, их величины постоянны и выбираются до начала расчета.

Проведенный анализ показывает неприемлемость описанных в литературе методов для обширных технико-экономических исследований.

Расчет по заводскому методу слишком трудоемок, так как все сравниваемые варианты доводится до стадии эскизного проекта. Решается задача со многими неизвестными путем подбора, при этом важную роль играет интуиция проектировщика, ибо зона нахождения оптимального варианта заранее неизвестна. Зная зону оптимального варианта (при заведомо гарантированной соблюдении всех поставленных технических условий), можно было бы существенно уменьшить число расчетных вариантов. Развиваемый в реферированной работе функциональный метод технико-экономических исследований может быть использован для поиска этой зоны. Он может дать проектировщикам объективный способ качественной оценки возможных результатов расчета и тем самым создать базу для окончательных расчетов трансформаторов по создаваемому высокой точностью заводскому методу. Он, таким образом, не отвергает заводской методики, а имеет целью ее дополнить.

Во второй главе. Главным критерием при сравнении вариантов служит величина всех расчетных затрат в денежном выражении, связанных с трансформацией электроэнергии. Оптимальный вариант должен соответствовать минимуму этих затрат, при безусловном удовлетворении всех поставленных технических требований (определенная мощность, допустимая температура обмоток, величина U_k и т.д.).

В соответствии с рекомендациями проф. И.Г.Грудинского и работами проф. И.Д.Кутявина в суммарных расчетных затратах учитываются следующие составляющие, отнесенные к одному году расчетного срока окупаемости:

1. Расчетная цена трансформатора с амортизационными отчислениями.

2. Расчетная стоимость добавочной мощности системы, необходимой для покрытия потерь в трансформаторе в период максимума нагрузки в системе.

3. Расчетная стоимость потерь активной и компенсации реактивной электроэнергии в трансформаторе.

Наиболее обобщенная запись всей переменной суммы затрат на производство и эксплуатацию:

$$Z = (A + \beta B^2 + 3r_{\text{дрст}}) Q_{\text{ст}} + [A + \beta \left(\frac{B}{K_2}\right)^2 + 3r_{\text{дря}}] Q_{\text{я}} + (\beta A K_p + E \Delta_1^2) Q_{\text{м1}} + (\beta A + E \Delta_2^2) Q_{\text{м2}} \quad (1)$$

$Q_{\text{ст}}, Q_{\text{я}}$ - активные веса стержней и ярем, кг;

$Q_{\text{м1}}, Q_{\text{м2}}$ - активные веса обмоток ВН и НН, кг;

Δ_1, Δ_2 - плотности тока обмоток, а/см²;

$r_{\text{дрст}}, r_{\text{дря}}$ - удельная намагничивающая мощность для стержней и ярем, кВа/кг;

K_2, K_p - коэффициенты усиления яря и увеличения веса обмотки ВН за счет половинного числа регулировочных витков;

B - индукция в стержне, тл;

β - коэффициент проводимости, численно равный отношению удельных стоимостей меди и стали в изделии;

$3r$ - удельные затраты на компенсацию, руб/квар.

A, B, E - обозначения для упрощения записи:

$$\left. \begin{aligned} A &= K_T (p_H + p_a) \\ B &= d_c (p_v C_1 + C_2' t) \\ E &= d_M \left(\frac{S_M}{S}\right)^2 (p_H C_1 K_M + C_2'' \tau K_H^2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

C_1', C_2'' - расчетная стоимость постоянных и переменных потерь, руб/квт.час;

d_c, d_M - удельные потери в стали и меди (алюминии) при единице электромагнитной нагрузки, кВт/кг;

K_M, K_H - коэффициенты попадания в максимум системы и роста нагрузки;

τ, t - годовое время потерь и включения трансформатора, часы;

$p_H = \frac{1}{T_p}$ - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

p_a - нормативные амортизационные отчисления;

K_T - коэффициент пропорциональности, численно равный удельной стоимости трансформатора в руб. на 1 кг приведенного веса активных материалов;

C_1 - расчетная стоимость установленного кВт добавочной мощности системы (затраты на собственные нужды, резерв мощности, добавочную пропускную способность сетей до места потребления 1 кВт, электростанция и топливную базу для нее), руб/квт.

Формула (1) выражает сумму переменных расчетных затрат на трансформацию электроэнергии в зависимости от геометрии и параметров трансформатора и экономических величин. Не вошедшие в (1) расходы по монтажу, компенсации реактивных потерь короткого замыкания и др. остаются для различных сравниваемых вариантов неизменными и на положение минимума расчетных затрат не влияют.

При желании выражение (1) легко представить как сумму стоимостей обмоток, стержней, ярем, затрат на потери и т.д., что позволяет проследить роль каждой составляющей в общей величине затрат.

Рассматривая каждую обмотку по элементам, получаем аналитические выражения для коэффициентов заполнения.

Для многослойной цилиндрической обмотки из круглого провода рассматриваем прямоугольник высотой h и шириной $(x_1 + l_1 + \delta_1)$. Выражение для коэффициента заполнения активным проводниковым металлом в этом случае:

$$K_1 = \frac{I_{e1}}{\Delta_1 (x_1 + l_1 + \delta_1) (x_1 + l_1) K} \quad (3)$$

Для слоевых обмоток из прямоугольного провода коэффициент заполнения слоя:

$$K_2 = \frac{I_{e2}}{\Delta_2 (x_2 + l_2) (y_2 + l_2) K} \quad (4)$$

Для непрерывных спиральных катушечных обмоток, применяемых в шахтных сухих трансформаторах типа ТСШВН, соответствующее выражение для коэффициента заполнения площади катушки:

$$K_1 = \frac{I_{e1}}{\Delta_1 (x_1 + i_1)(y_1 + i_1)} \quad (5)$$

Таким образом, при всяких изменениях плотностей тока Δ , чисел параллельных проводов, осевых и радиальных размеров y и x и собственной толщины изоляции проводов i , имеющих место в сравниваемых вариантах, коэффициент заполнения окна будет соответственно изменяться, что позволит выбрать оптимальный вариант с большей точностью, нежели при постоянстве коэффициента заполнения. Это обстоятельство — одно из преимуществ метода исследования.

Уравнения для "физических ограничений" при поиске оптимального варианта с учетом (3), (4), (5) имеют вид:

$$S = K \Delta_2 V q_{m2} \frac{\pi d^2}{4} K_c$$

$$I_1 = m_1 \Delta_1 \pi \frac{x_1^2}{4}$$

$$I_2 = m_2 \Delta_2 x_2 y_2$$

$$U_p = \frac{2\pi^2 K_2 \Delta_2 q_{m2} l_m (b_1 + b_2 + 3\delta_{12}) 10^{-4}}{33,3 V q_c h} \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \frac{\Delta_1 I_{e1} n_1 \rho}{(x_1 + i_1) r_1 K_{n1} K'}$$

$$\sigma_2 = \frac{\Delta_2 I_{e2} n_2 \rho}{(y_2 + i_2) r_2 K_{n2} K''}$$

$$\frac{I_{e1} n_1}{(x_1 + i_1) K'} = \frac{I_{e2} n_2}{(y_2 + i_2) K''}$$

Величины, относящиеся к обмотке ВН, снабжены индексом 1,
— к обмотке НН — индексом 2.

- I — фазный ток, а ;
- I_{e1} — ток параллельного провода, а ;
- m — число параллельных проводов ;
- q_m — активное сечение меди (алюминия) обмотки, см² ;
- d — диаметр стержня, см ;
- b — радиальный размер обмотки, см ;
- l_m — длина канала рассеяния, см ;
- h — высота обмоток, см ;
- q_c — активное сечение стали стержня, см² ;
- n — число слоев обмотки ;
- ρ — число поверхностей охлаждения обмотки ;
- K_n — коэффициент, учитывающий закрытие поверхности охлаждения обмотки изоляционными деталями ;
- K_2 — коэффициент Роговского ;
- σ — плотность теплового потока с поверхностей обмотки, Вт/см² ;
- K', K'' — коэффициент неплотности намотки ;

$$K = 3\pi\sqrt{2} f 10^{-7}$$

Потери в процессе поиска оптимального варианта являются переменными. Их оптимальные величины определяются минимумом расчетных затрат. Учет добавочных потерь значительно усложнит бы расчетные формулы. Предполагалось, что добавочные потери в баке и конструктивных элементах одинаковы для сравниваемых вариантов, и поэтому на положение минимума расчетных затрат не влияют. Добавочные потери в стали и проводниковом металле примерно равны, следовательно, их учет также окажет заметное влияние лишь на величину минимума расчетных затрат.

В третьей главе исследованы масляные трансформаторы с соче-

таннем обмоток: многослойная из круглого (ВН) — слоевая из прямоугольного (НН) проводов и многослойные из круглого провода на сторонах НН и ВН на примере трансформаторов напряжением ВН 10 и 35 кв.

Поскольку одни и те же зависимости для трансформаторов различных мощностей подобны, все выводы сделаны по результатам исследования трансформаторов трех мощностей: 100, 250 и 630 кВА с медными и алюминиевыми обмотками.

Все размеры, веса, потери, затраты и т.д. находятся в зависимости от восьми переменных, входящих в систему "физических ограничений" (6), $x_1, x_2, \Delta_1, \Delta_2, \alpha, h, n_1, y_2 (n_2)$, каждая из которых путем решения системы (6) выражается функцией от одной независимой переменной. Показано, что за независимую переменную целесообразно принять диаметр голого провода обмотки ВН — x_1 .

Оптимальное значение x_1 (следовательно и всех других характеристик и показателей трансформатора) соответствует минимуму расчетных затрат, координатная зависимость которых от x_1 — довольно сложная функция. Ее дифференцирование по x_1 затруднительно.

Поиск минимума осуществлялся численным способом с помощью быстродействующей ЭЦВМ М-20 методом направленного поиска в Вычислительном центре СО АН СССР; вместе с вводом данных и печатью результатов время расчета — поиска для шести (трех "медных" и трех "алюминиевых") трансформаторов составляет не более трех минут.

Установлено, что при монотонном изменении x_1 или других переменных функция расчетных затрат имеет довольно крутой минимум. Все же отступление от $x_{1кр}$ на один шаг обмоточного прохода по стандарту существенного роста затрат не вызывает. Отступление, в случае необходимости, желательно делать в сторону увеличения x_1 , ибо при этом вес более дорогой по сравнению со сталью меди уменьшается.

Отступление от критической величины диаметра стержня на 1-2 см вызывает увеличение затрат не более, чем на 3%. Это обстоятельство также может оказаться важным при окончательном расчете, скажем, по заводскому методу, где отправным моментом служит выбор диаметра стержня.

При исследовании по марке стали было обнаружено, что наиболее

экономичный трансформатор — с магнитопроводом из стали 0,35 мм Э-330 (ГОСТ 802-58). Рост затрат с ухудшением марки стали происходит за счет увеличения потерь и высоты стержня.

Показано, что при изменении индукции расчетные затраты проходят через минимум. Критическое значение индукции, например, для стали Э-330-035 близко к $1,65 \frac{B_0}{M^2}$, для Э-43-0,35 — к $1,4 \frac{B_0}{M^2}$.

С ростом мощности для марки холоднокатанной стали уменьшение $B_{кр}$ почти незаметно. Для горячекатанной — оно составляет 0,3 — 0,4 $\frac{B_0}{M^2}$. Учитывая очень пологий характер минимума затрат (отступление от $B_{кр}$ на $\pm 0,5 \frac{B_0}{M^2}$ вызывает увеличение затрат лишь на доли процента), и в этом случае можно принять для всего диапазона исследуемых мощностей одно и то же значение $B_{кр}$.

С увеличением числа параллельных проводов минимальные затраты монотонно растут, но очень слабо, а при увеличении числа слоев n_2 — в среднем на 5% на каждый слой. Поскольку не всегда возможно взять наименьшие значения m_1, m_2 и n_2 , то выбор этих величин следует производить на основе имеющегося опыта.

Снижение затрат от уменьшения толщины изоляции проводов l_1 и l_2 до 0,1 мм, например, за счет возможного применения эмалевой изоляции на основе синтетических пленок, составляет 2-4% и особенно эффективно для алюминия.

Показано, что при изменении в широких пределах экономических коэффициентов β, k_t, C_1 (их точные значения, зависящие от многих факторов, почти всегда невозможно определить до расчета), ρ_n, β_p оптимальная геометрия трансформатора практически одна и та же. Например, при изменении β от 1 до 5,5 (медь) и от 1 до 7 (алюминий) увеличение $x_{1опт}$ для $S = 630$ кВА (где оно максимально) составляет всего 0,0025 см. Значение этого вывода трудно переоценить, так как при технико-экономических исследованиях, в первую очередь, важно знать положение, а не величину минимума расчетных затрат.

Исследования выявили наличие критических сочетаний σ_1 и σ_2 , в большинстве случаев существенно меньших их допустимых значений. Стремление к увеличению удельных тепловых нагрузок сверх критических величин экономически неоправдано. Исследование поведения расчетных затрат для удобства проведено в зависимости от λ ($\lambda = \sigma \rho k n$). Критические λ_1 и λ_2 для меди:

$\lambda_1 = 0,21 - 0,31$, $\lambda_2 = 0,24 - 0,35$. В случае применения на стороне ВН обмотки из круглого провода: $\lambda_1 = 0,16 - 0,27$, $\lambda_2 = 0,2 - 0,29$. Для алюминия соответствующие критические значения ниже на 20 - 30%. Показано, что для достижения примерно равных сроков службы изоляции обмоток целесообразно выбирать $\rho_1 = 3$ и $\rho_2 = 4$.

Доказательством правильности метода служит также наличие минимума расчетных затрат по U_p . Характерно, что для "медных" и "алюминиевых" моделей оптимальные значения U_p равны и близки к 5%.

При исследовании трансформаторов с алюминиевыми обмотками не выявлялись ни модели, ни характеристики (в том числе и потери) медных вариантов. Подтверждено, что оптимальный "алюминиевый" трансформатор имеет вытянутую в высоту геометрию. Его обмотка выше на 30-40%, потери больше на 3-7%, а размеры в плане на 4-8%, причем диаметр стержня не больше, чем у соответствующего "медного" трансформатора. Вес алюминия составляет 0,53 - 0,6 от веса меди. Приведенный материал позволяет сделать вывод о равноценности алюминия, как обмоточного материала, меди, а при учете дефицита последней признать его более предпочтительным, что не противоречит данным литературы.

Интересны весовые и энергетические характеристики оптимального трансформатора. Завод - изготовитель, как отдельное предприятие, предпочел бы вариант наименьшей стоимости (приведенного веса активных материалов). Например, для "алюминиевого" трансформатора 250 кВА этому варианту соответствует $X_1 = 0,146$ см, $Z \approx 380$ руб. Эксплуатирующим предприятиям желателен был бы вариант с максимальным КПД. ($X_1 = 1,196$ см, $Z \approx 430$ руб.). В целом народному хозяйству выгоден вариант с минимальным значением Z , чему соответствует $X_1 = 0,171$ ($Z_{min} = 306,38$ руб.). Он, таким образом, промежуточный: потери меньше чем в первом, но больше чем во втором, а вес больше, чем в первом, но меньше, чем во втором случаях. Суммарные потери оптимальных трансформаторов на 3-15% меньше значений, рекомендованных ГОСТ 12022-66.

В реферируемой работе прослежена зависимость не только расчетных затрат, но также размеров, весов, потерь и других показателей трансформаторов при изменении тех или иных исходных

данных для всех исследуемых случаев.

В четвертой главе исследованы сухие трансформаторы для шахтных взрывобезопасных подстанций типа ТСШВП, серийно выпускаемых с 1961 г.

Одним из важнейших направлений совершенствования электрооборудования угольных шахт является замена стационарных участковых подстанций с трансформаторами ТМШ передвижными взрывобезопасными подстанциями.

В СССР созданию таких подстанций предшествовала многолетняя кропотливая работа, причем основное внимание было направлено на создание надежной взрывобезопасной конструкции, способной выдержать все испытания. Вопросы оптимизации остались в стороне. Тем не менее при все возрастающем объеме производства и высокой цене оптимизация подобных трансформаторов представляет значительный интерес.

Взаимный теплообмен источников тепла (магнитопрод - обмотка ВН: обмотка ВН - обмотка ВН) заметно влияет на их температуру, что предопределяет включение в число "физических ограничений" уравнения теплового баланса магнитопровода.

С целью учета тепловых ограничений при выборе оптимальной геометрии рассматривается тепловой баланс элементов обмоток и магнитопровода, то есть выводятся уравнения для некоторых расчетных плотностей тепловых потоков.

Для обмотки ВН рассматриваем в катушке "средний" провод, теплоотдачей которого в радиальном направлении пренебрегаем. Аппроксимируя выражение для коэффициента эффективности теплоотдачи конвекцией в горизонтальных каналах прямой линией

$$\beta_{\text{к}} = 1,64 \frac{\delta_1}{b_1}, \quad (7)$$

получаем:

$$\sigma_1 = \frac{P_{\text{м1}}}{S_1} = \frac{\Delta_1 P I_1 W_{\text{к}}}{3,28 \delta_1 K_{\text{п1}}} \quad (8)$$

для обмотки ВН рассматривается слой наибольшего диаметра: -

$$\sigma_2 = \frac{P_{n2}}{S_2} = \frac{\rho I_{c2} m_2 \Delta_2 \sqrt{10h}}{0,56 (y_2 + z) \sqrt{(10\delta_{2-1})^{1,6} \rho K_{n2} K}} \quad (9)$$

Для магнитопровода - только стержни по высоте окна: -

$$\sigma_0 = \frac{P_{ст}}{S_{ст}} = \frac{0,7 d_c K_c \rho_c B^2 d \sqrt{10(h+2l_w)}}{(e'+e'') K_{no} \sqrt{(5\delta_{0-2})^{1,6} + e'n_0 \sqrt{(10\delta_0)^{1,6}}} \quad (10)$$

P' и S' - потери и эффективная поверхность охлаждения соответствующих элементов, Вт, см².

δ - (с различными индексами) - размеры охлаждающих каналов, см,

W - число витков в катушке обмотки ВН.

Система "физических ограничений" из восьми уравнений содержит 9 переменных: $x_1, y_1, W_k, x_2, y_2, \Delta_1, \Delta_2, d, h$. За независимую переменную в этом случае целесообразно принять высоту обмотки h . Среднее время расчета - поиска для одного трансформатора на ЭЦВМ М-20 80 сек.

Выбор оптимальных сочетаний $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ производился при безусловном удовлетворении требований минимума величины расчетных затрат, габаритных и температурных ограничений:

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= 1,4\tau_1 + \tau_0 \leq 160^\circ\text{C} \\ \theta_2 &= 1,4\tau_2 + \tau_0 \leq 160^\circ\text{C} \\ \theta_0 &= 1,25\tau_0 + \tau_0 \leq 160^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Для этого по каждому трансформатору (100, 160, 250 и 400кВа) было намечено в определенной последовательности по 220-250 комбинаций σ , для каждой из которых осуществлен расчет - поиск варианта с минимальными затратами.

θ - максимальные перегревы, °С;

τ - средние превышения температур, °С;

τ_0 - превышение температуры воздуха внутри кожуха, °С.

Обработка полученных результатов показала, что в зависимости от мощности оптимальные сочетания σ следующие:

$\sigma_0 = 0,08 - 0,093$; $\sigma_1 = 0,2 - 0,16$; $\sigma_2 = 0,092 - 0,68$ ($\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$). Оптимальные действительные плотности тепловых потоков, подсчитанные без учета взаимного влияния, как простые отношения потерь в обмотках и магнитопроводе к соответствующим суммарным эффективным поверхностям охлаждения, - $\sigma_0' = 0,044 - 0,055$; $\sigma_1' = 0,071 - 0,081$; $\sigma_2' = 0,095 - 0,073$ ($\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$).

Как показали исследования, критическое значение индукции в сильной степени зависит от мощности: $S = 100 - B_{кр} = 1,65$, $S = 160 - B_{кр} = 1,58$, $S = 250 - B_{кр} = 1,52$, $S = 400 - B_{кр} = 1,48$ ($\frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}$). При отступлении от $B_{кр}$ на $\pm 0,2 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}$

затраты возрастают до 1,5% (сталь 0,35 мм Э-330 ГОСТ 302-58).

С ухудшением марки стали $B_{кр}$ резко уменьшается, что сопровождается ростом затрат, высоты обмотки и перегревов.

В структуре наименьших расчетных затрат большая доля приходится на стоимость обмоток (до 50%), против 20% для масляных трансформаторов. Стоимость магнитопровода достигает 18%, затраты на покрытие потерь в обмотках и магнитопроводе примерно равны и составляют по 15-16%, в противоположность масляным, где они максимальны и составляет каждая 32-27%.

Минимум расчетных затрат в зависимости от U_p наблюдается вблизи точки $U_p = 3,5\%$. Выбор $U_k = 5,5\%$, как это сделано в исследуемых, а также в выпускаемых промышленностью, трансформаторах увеличивает затраты на 5-7%.

Доказано, что как и для масляных трансформаторов экономические коэффициенты на оптимальную геометрию не влияют.

В области реальных значений нет таких размеров охлаждающих каналов, при которых расчетные затраты имели бы абсолютный минимум.

В работе приводятся оптимальные размеры, энергетические, весовые и прочие показатели трансформаторов 100, 160, 250 и 400 кВа, напряжением ВН 6 кВ.

Сравнение с трансформаторами, спроектированными на БТЗ, из которых подстанция 160 кВа серийно выпускается Хмельницким заводом, показывает, что в расчете на 1 кВа исследуемые трансформаторы, за некоторым исключением имеют повышенный до 11% расход активной стали, в 1,5 - 2 раза меньше потери в стали (без добавочных), до 45% меньший вес активной меди и большие до 25% потери в ней (I^2R).

Расчетные затраты трансформаторов ЭТБ, подсчитанные по используемой методике, выше на 9 - 26%, чем у оптимальных вариантов исследуемых трансформаторов.

Оптимизация шахтных трансформаторов представляется нам перспективной, и мы надеемся, что реферируемая работа, являющаяся первой попыткой в этом направлении, заинтересует и других инженеров.

Основные результаты работы

1. В применении к масляным трансформаторам I и 2 габаритов развит метод технико-экономических исследований и доказана возможность его использования на примере трансформаторов класса 10 и 35 кВ. Метод позволяет определять размеры и параметры из условия абсолютного минимума расчетных затрат на производство и эксплуатацию трансформаторов, или при необходимости из условия минимального веса материалов или максимального К.П.Д.

2. Исследована возможность применения алюминиевого провода и подтверждено, что, как обмоточный материал, алюминий равноценен меди, а при учете дефицитности последней - более предпочтителен. Найден оптимальные соотношения между основными характеристиками "алюминиевых" и "медных" трансформаторов.

3. Доказана принципиальная возможность применения используемого метода для специальных трансформаторов, в частности, впервые проведена оптимизация сухих шахтных трансформаторов для комплектных взрывобезопасных передвижных подстанций типа ТСШВП.

При выборе основных размеров учтены тепловые ограничения и получены оптимальные значения удельных тепловых нагрузок. Знание последних важно для проектирования, однако рекомендации по их выбору в литературе отсутствуют.

4. Исследовано влияние различных исходных данных расчета на размеры, затраты и другие показатели. Метод дает возможность проанализировать всю совокупность связей между размерами, весами и характеристиками трансформатора при изменении любой из исходных данных, в том числе при применении любых активных и изоляционных материалов.

5. Исследования показали, что при выборе основных размеров B , u_k и (для масляных трансформаторов) σ_1 и σ_2 следует учитывать наличие минимума расчетных затрат по этим параметрам.

6. Установлена практически полная независимость оптимальной геометрии трансформаторов от коэффициентов экономического расчета, что позволяет широко их использовать для целей оптимизации.

7. Выявлена структура затрат для оптимальных вариантов и установлена роль каждой составляющей при возможных отступлениях от оптимального варианта.

8. Все исследования проведены при переменных коэффициентах заполнения окна активной медью (алюминием), что является новым и увеличивает точность определения оптимального варианта. Как показано, оптимальные варианты имеют весовые и энергетические характеристики не хуже, чем трансформаторы, выпускаемые отечественной промышленностью.

По теме диссертации написаны следующие статьи:

1. М.Д. Кутявин, В.А. Зорин. Технико-экономическое обоснование выбора оптимальных размеров силовых трансформаторов малой мощности. Надежность и экономичность электрооборудования нефтехимических заводов, вып. I, Омск, 1967.

2. В.А. Зорин. Технико-экономические исследования оптимальных размеров силовых трансформаторов I и 2 габаритов. Надежность и экономичность электрооборудования нефтехимических заводов, вып. I, Омск, 1967.

3. В.А. Зорин. К вопросу применения алюминиевых обмоток в масляных распределительных трансформаторах. Известия ТИИ, том 162, 1967.

4. В.А. Зорин. Технико-экономический выбор оптимальной геометрии шахтных трансформаторов. Известия ТИИ, том 179 (в печати).

5. В.А. Зорин. Выбор оптимальных сочетаний плотностей тепловых потоков с поверхностями активных частей шахтного сухого трансформатора из технико-экономических соображений. Труды Восточно-Сибирского технического института (в печати).

6. И.Д.Кутявин, В.А.Зорин. Техничко-экономическое исследование шахтных сухих трансформаторов. Труды Восточно-Сибирского технологического института (в печати).

Материалы диссертации докладывались в ОГК Тольяттинского электротехнического завода (апрель 1966), на научно-техническом Совете Армянского электрозавода (г.Ереван, 14 сентября 1967), на совещании ведущих специалистов при ОГК Хмельницкого завода трансформаторных подстанций (25 сентября 1967, г.Хмельницкий), на заседаниях кафедры "Электрические машины, микромашины и аппараты" Ереванского политехнического (18 сентября 1967), "Электрические машины" Уральского политехнического (г.Свердловск, 3 октября 1967), "Электрические машины" Омского инженеров транспорта (6 октября 1967), "Электрические машины" Томского политехнического (2 ноября 1967) институтов.

309053

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР