

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ МОДЕРНИЗАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Р.А. Миронов, Т.В. Усачева

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа 5АМ43

Научный руководитель: Т.В. Усачева, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Современным подходом к проектированию трансформаторов является принятие новых расчетных и конструктивных решений, направленных на обеспечение требований по повышению ресурсосбережения. На сегодняшний день у электротехнических организаций имеется обширный арсенал материалов и технических решений, позволяющих эффективно выполнять оптимальное проектирование электротехнических устройств. Поэтому в качестве цели исследования модернизации силового трансформатора была поставлена задача определения возможности замены материала обмоток силового трансформатора на этапе оптимального проектирования.

Метод оптимального проектирования позволяет вести предварительный расчет силового трансформатора в обобщенном виде, без углубления в особенности технологии изготовления, но с оценкой результатов с разных точек зрения, в том числе и с экономической. С учетом оптимального проектирования силового трансформатора можно обеспечить его ресурсосбережение при соответствующей мощности, т. е. среди альтернативных вариантов выбрать оптимальную геометрию силового трансформатора при минимальных затратах активных материалов выполнив оценку стоимости активной части [1].

При модернизации и совершенствовании линейки распределительных силовых трансформаторов для изготовления обмоток используется медь или алюминий. Разрыв между производством меди и ростом ее потребления, а также выявленными при эксплуатации недостатками алюминия привели к поиску конструктивного решения обмоточного провода, сочетающего лучшие свойств обоих материалов. Перспективным решением становится – алюмомедь, материал, который благодаря своему строению (сердечник из алюминия, покрытый медной лентой) сочетает в себе свойства высокой электропроводности от меди и малого удельного веса от алюминия [2].

Таким образом становятся очевидным возможность модернизации трансформаторов, изготовленных из алюмомедного обмоточного провода. Для количественной оценки нужно определить стоимость активной части, выполнить сравнение экономических и электротехнических показателей обмоток, сделанных из меди, алюминия, алюмомеди, в чем и может помочь оптимальное проектирование.

Оценка возможностей модернизации трансформаторов при проектировании с целью определения замены материала обмоток выполнено на примере трехфазного силового трансформатора марки ТМ номинальной мощностью $S_N = 160$ кВА, с соотношением напряжений $U_{ВН}/U_{НН} = 35/0,4$ кВ, потерями $P_{ХХ} = 0,46$ кВт и током $I_{ХХ} = 1,7$ % холостого хода.

Свойства алюмомедного провода отличаются от медного и от алюминиевого, из-за чего проектирование трансформаторов по принятым для них эмпирическим коэффициентам при определении коэффициента экономичности требует корректировки. Примем проводимость меди 100 %, тогда алюминиевый проводник будет иметь проводимость 62 %, а алюмомедный соответственно 68 %. При расчете механических напряжений используются пределы прочностей данных материалов, а эмпирические коэффициенты подбираются с помощью пропорций.

Принятые основные эмпирические коэффициенты, используемые при проектировании силовых трансформаторов с обмотками на основе медных, алюминиевых и алюмомедных проводов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение эмпирических коэффициентов при проектировании

Обозначение коэффициента	Расшифровка коэффициента	Материал обмоток		
		Медная	Алюминиевая	Алюмомедная
K_j	Коэффициент определения плотности тока	0,746	0,463	0,508
K	Коэффициент предельного значения x для плотности тока	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$12,75 \cdot 10^{-12}$	$5,79 \cdot 10^{-12}$
$K(M)$	Коэффициент определения механического растягивающего напряжения в проводе	$0,244 \cdot 10^{-6}$	$0,152 \cdot 10^{-6}$	$0,17 \cdot 10^{-6}$

В результаты проектирования силового трансформатора с разными материалами обмоток представлены в табл. 2. Сравнение силовых трансформаторов в зависимости от материала обмоточного провода проводилось по: коэффициенту экономичности (β), средней плотности токов, механической прочности, геометрии окна магнитной системы (диаметр, длина и расстояние между стержнями), геометрии обмоток (диаметр провода, внешние и внутренние диаметры обмоток), массе стали и металла обмоток, параметрами, регламентируемыми ГОСТ 11677-85 [3].

Таблица 2. Параметры трансформатора ТМ-160
в зависимости от материала обмоточного провода

Обозначение параметра, ед. измерения	Расшифровка параметра	Материал обмоток		
		Медь $\beta=1,681$	Алюминий $\beta=1,073$	Алюмомедь $\beta=1,152$
d , м	Диаметр стержня	0,14	0,13	0,13
P_{Σ} , м ²	Активное сечение стержня	0,0135	0,0120	0,0120
d_{12} , м	Диаметр осевого канала между обмотками	0,196	0,193	0,185
l , м	Высота обмотки	0,366	0,565	0,505
l_c , м	Высота стержня	0,516	0,715	0,595
c , м	Расстояние между осями соседних стержней	0,303	0,313	0,297
$C_{a.ч.}$, о.е.	Стоимость активной части	518,7	463,8	468,2
$P_{\Sigma\Sigma}$, Вт	Потери холостого хода	422,3	428,9	402,6
$I_{\Sigma\Sigma}$, %	Ток холостого хода	1,596	1,273	1,278
G_c , кг	Масса стали в стержнях	140,7	174,0	158,3
$G_{я.}$, кг	Масса стали двух ярм	169,2	148,1	141,6
$G_{\gamma.}$, кг	Масса стали угла плоской магнитной системы	13,3	10,7	10,7
$G_{\Sigma.}$, кг	Общая масса стали магнитной системы	309,9	322,1	299,8
G_o , кг	Масса металла обмоток	108,7	69,1	85,2
$G_{пр.}$, кг	Действительная масса провода для обмотки	115,4	78,3	93,0

Поиск оптимального варианта для определения минимальной стоимости активной части ведется графически (рис. 1–3). Заштрихованные зоны определяют параметры, являющиеся ограничениями. Выбор значения коэффициента экономичности (β) предусматривается только в незаштрихованных зонах [4].

Так анализ графического представления результатов расчета силового трансформатора с обмотками из меди показывает предельное значение $\beta = 2,09$ для заданного значения потерь холостого хода $P_{\Sigma\Sigma} = 0,46$ кВт. Для значения тока холостого хода $I_{\Sigma\Sigma} = 1,7$ % предельное значение $\beta = 1,89$. Предельные значения для плотности тока, при допустимой плотности тока $J = 4,5 \cdot 10^6$ А/м², и механической прочности, с допустимым значением $\sigma_p = 60$ МПа, ны $\beta = 5,42$ и $\beta = 47,64$ соответственно. Окончательное решение по выбору параметра β принимаем с учетом нормализованных диаметров стержня. Выбираем диаметр стержня магнитной системы $d = 0,14$ м при $\beta = 1,681$. Все рассматриваемые параметры оказываются в пределах допустимых значений. Проведя аналогично анализ результатов расчета для обмоток из алюминия и алюмомеди выбираем диаметры стержня магнитной системы $d = 0,13$ м при $\beta = 1,073$ и $d = 0,13$ м при $\beta = 1,152$ соответственно.

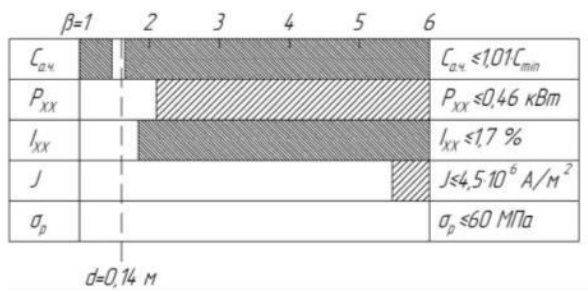


Рис. 1. Определение оптимального значения β и диаметра стержня d для варианта с медными обмотками

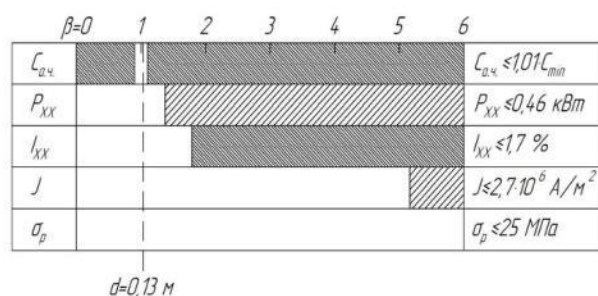


Рис. 2. Определение оптимального значения β и диаметра стержня d для варианта с алюминиевыми обмотками

Для наглядной оценки возможностей модернизации по результатам оптимального проектирования были построены гистограммы (рис. 4–7), показывающие сравнение основных параметров трансформатора в зависимости от материала обмоток.

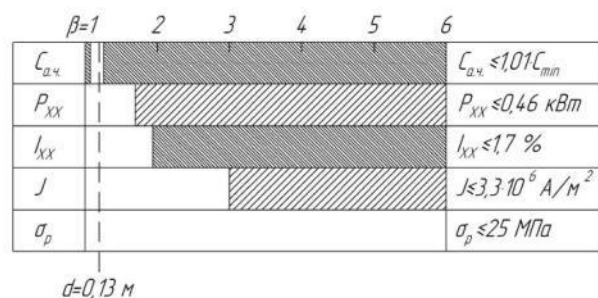


Рис. 3. Определение оптимального значения β и диаметра стержня d для варианта с алюмомедными обмотками

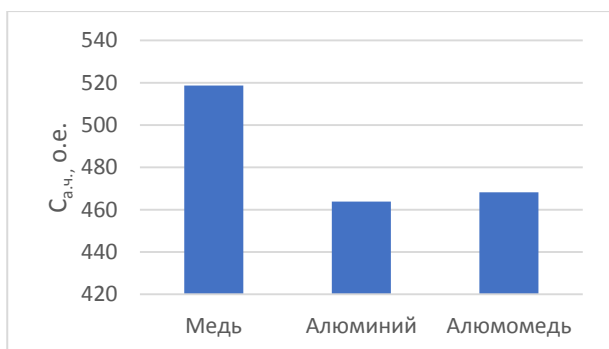


Рис. 4. Стоимость активной части трансформатора



Рис. 5. Масса обмоток трансформатора

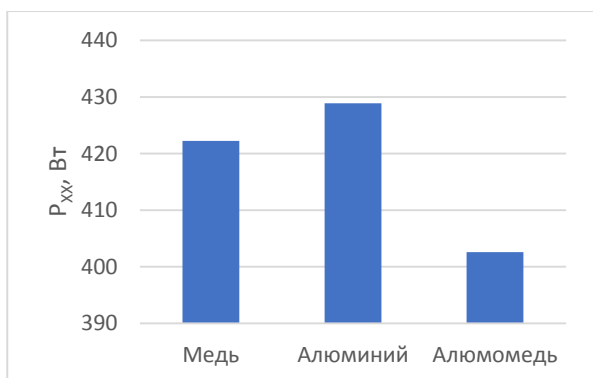


Рис. 6. Потери холостого хода

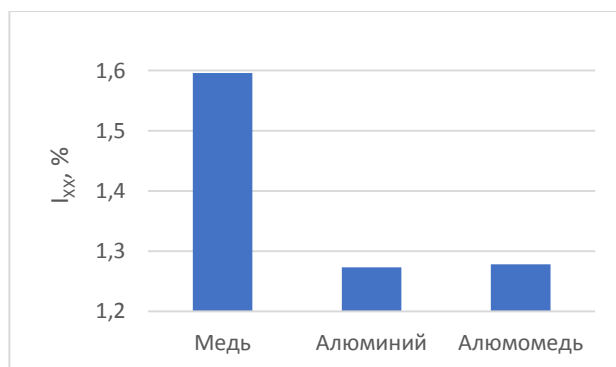


Рис. 7. Ток холостого хода

В процессе расчетов, анализа и оценки таблиц и графических зависимостей было выявлено, что вариант трансформатора ТМ-160/35 с алюмомедными обмотками, в силу меньшего значения массы активной части и равных электротехнических характеристиках, является наиболее выгодным решением. Так минимальная стоимость активной части с алюмомедными обмотками будет ниже и составит 468.2 о.е., с медными 518.7 о.е. и с алюминиевыми 463.8 о.е. соответственно. При этом стоимость материалов обмоток составляет: для провода из алюмомеди АМ-120 1366 руб/кг; для провода из меди М-120 709 руб/кг; для провода из алюминия А-120 1147 руб/кг [5].

При применении обмоток силового трансформатора на основе алюмомедных проводов так же наглядно видно уменьшение уровня потерь и тока холостого хода.

Результаты проектирования силовых трансформаторов показывали, что переход с медных обмоток на алюминиевые при изменении основных размеров магнитопровода приводит к тому, что потери в сердечнике практически не изменяются. Но разница по плотности тока между медью и алюминием при изменении основных размеров магнитопровода позволяет увеличить поперечное сечение алюминиевого проводника, что уменьшает затраты на материалы и снижает стоимость активной части. Алюмомедные провода, в этом случае, являются оптимальным решением, поскольку стоимость алюмомедного проводника сопоставима со стоимостью алюминиевого, а электротехнические свойства близки к проводу из меди, поэтому затраты, необходимые на алюмомедный материал, будут окупаться его электротехническими параметрами, что с учетом постоянно повышающейся стоимостью электроэнергии принципиально.

Следовательно, при дальнейшей оценке возможностей модернизации трансформаторов при проектировании оптимальный вариант нужно искать при соотношении толщины слоя меди относительно алюминия в алюмомедном обмоточном проводе и учете особенностей технологии изготовления биметаллического провода, что в свою очередь отразится на значениях эмпирических коэффициентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров П.М. Расчёт трансформаторов: учебное пособие. – Изд. 7-е. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 528 с.
2. Елшибек А.А. Исследование возможности модернизаций силового трансформатора с обмотками из алюминия // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы III российской молодежной научной школы-конференции, г. Томск, 21–23 октября 2015 г. – Томск: СКАН, 2015. – С. 25–27.
3. ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – ИПК издательство стандартов. – 39 с.
4. Сунь Хунбо, Ши Си Обоснование выбора основных размеров силовых трансформаторов / науч. рук. Т.В. Усачёва // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: труды IX региональной научно-практической студенческой конференции, 2–5 июня 2009 г., Томск / Томский политехнический университет (ТПУ), Электротехнический институт (ЭЛТИ). – 2009. – Т. 1: Секция 1–2. Электроизоляционная и кабельная техника. Электротехническое материаловедение и электротехнологии. Секции 8–9. Электрические машины. Электрические и электронные аппараты. Секция 10. Инженерная и компьютерная графика. – С. 125–128. – Библиогр.: 1 назв.
5. Повный А. Алюмомедные провода [Электронный ресурс] // Электрик Инфо: сайт для электриков. – URL: <https://elektrik.info/main/news/538-alyumomednye-provoda.html> (дата обращения 31.10.2024).