УДК 621.3.042.52

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ НА ПОТЕРИ В МАГНИТОПРОВОДЕ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ШИХТОВКИ МАГНИТОПРОВОДА

К. И. Багаев

В статье представлены основные способы производства магнитопроводов трансформаторов. Для двух основных систем проведены исследования влияния магнитной индукции на удельные потери в магнитопроводе. Проведён анализ полученных данных.

Ключевые слова: магнитопровод, система шихтовки, потери, трансформатор

Распределительные трансформаторы мощностью 25-630 кВА напряжением 6-10 кВ – наиболее массовая серия производимых и эксплуатируемых трансформаторов в нашей стране и за рубежом. Общее количество распределительных трансформаторов в России составляет более чем 3 млн. шт. с установленной мощностью более 350 млн кВА. Ежегодное потребление электроэнергии в России находится на уровне 1 трлн. кВт·ч, при этом общие потери электроэнергии в распределительных трансформаторах оцениваются в 75 млрд. кВт·ч. В целом от потерь в магнитопроводах теряется 4 % производимой в стране электроэнергии, причем значительная часть потерь приходится на распределительные трансформаторы.

Потери в магнитопроводе распределительного трансформатора можно снизить двумя путями: улучшением качества материала, изменением конструкции. В большинстве современных распределительных трансформаторов магнитопровод выполнен из холоднокатаной анизотропной электротехнической стали. Есть современные разработки с использованием аморфной стали, но из-за высокой стоимости её экономическая эффективность не доказана. С конструкцией магнитопровода не всё так просто. По способу соединения стержней с ярмами магнитопроводы подразделяют на стыковые, шихтованные, навитые.

В стыковых магнитопроводах стержни и ярма собирают из пластин электротехнической стали, а затем соединяют по плоскости разъема после насадки обмотки на стержень. Данная конструкция не используется из-за того, что в месте стыка возникают большие потери [1].

В шихтованных магнитопроводах пластины стержней и ярм собирают в переплёт – шихтуют, благодаря чему они не имеют сплошного стыка в плоскости поперечного сечения, что приводит к существенному уменьшению немагнитных зазоров и тока холостого хода по сравнению со стыковыми магнитопроводами. По форме стыка пластин стержней и ярм шихтованные магнитопроводы выполняются с прямыми, косыми стыками и по схеме “STEP-LAP” [2].

Схема с прямым стыком имеет зону, в которой направление проката стали и магнитного потока не совпадают. При использовании анизотропной холоднокатаной стали несовпадение направлений прокатки и магнитного потока, как показано на рисунке 1, приведёт к существенному увеличению потерь и тока холостого хода.

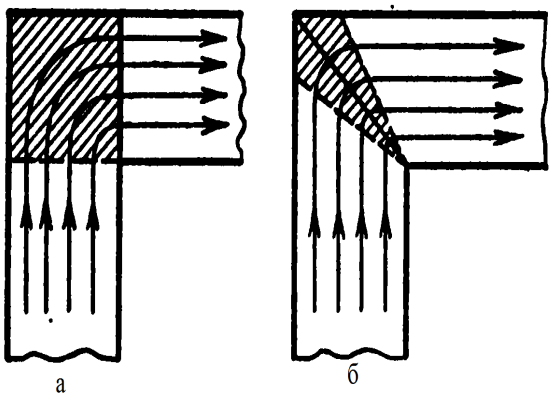

Рисунок 1 – Направление магнитного потока в стыке:
а – прямой стык;
б – косой стык

Схема с косыми стыками частично решает данную проблему; при косом стыке направление магнитного потока в местах его поворота в большей степени совпадает с направлением проката стали, что позволяет снизить намагничивающую мощность и потери магнитопровода.

Система с прямым и косым стыком применяется и в современных трансформаторах, но эти системы постепенно вытесняются более технологичными [4].

Наиболее совершенной из плоских шихтованных магнитопроводов является схема шихтовки «Step-lap», представленная на рисунке 2 [2].

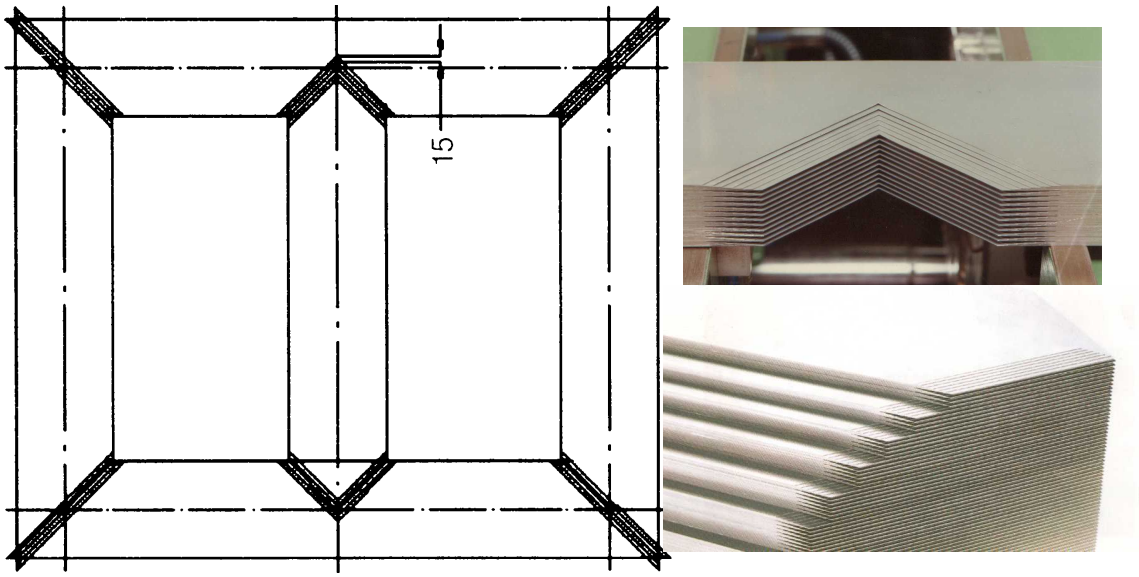

Рисунок 2 – Магнитопровод со схемой шихтовки “ Step-lap *”*

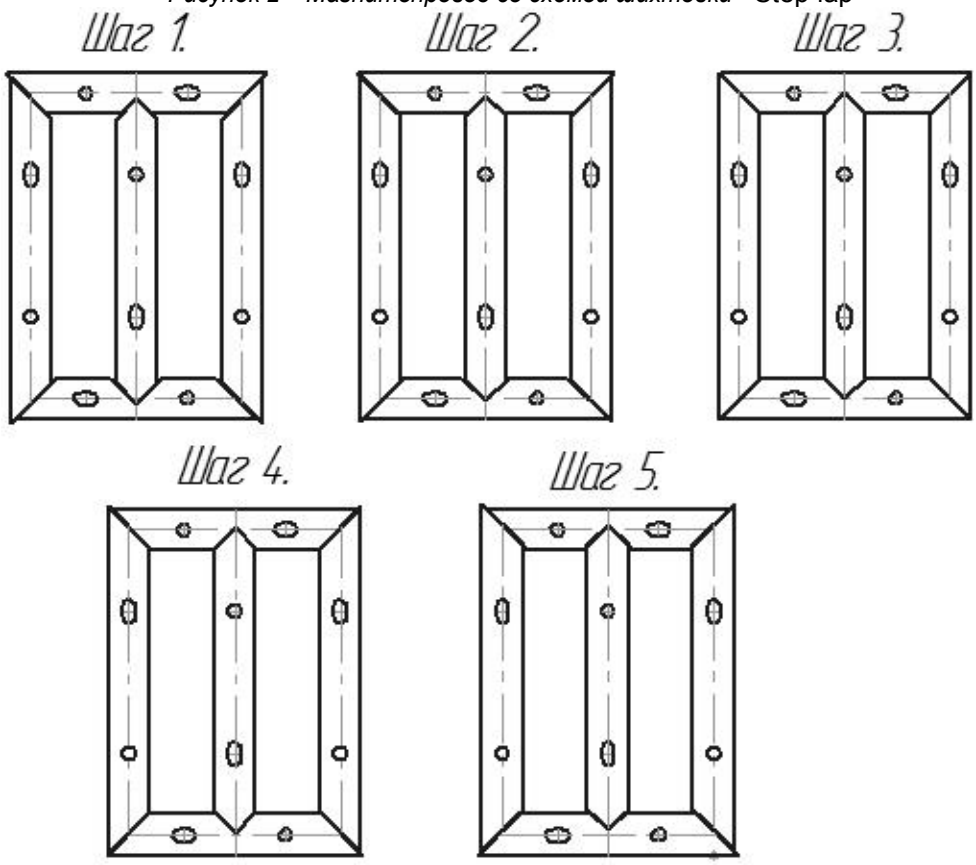

Рисунок 3— Схема шихтовки «Step-lap

При схеме шихтовки «Step-lap» сборка пакетов осуществляется в пять положений со сдвигом относительно друг друга на 15 мм, как показано на рисунке 3. Сдвиг пакетов от-

носительно друг друга позволяет перекрывать косые стыки и минимизировать зону, в которой направление магнитного потока не совпадает с направлением проката стали, и уменьшить влияние воздушных зазоров.

В настоящее время большинство трансформаторов – от распределительных до мощных – выполнены по данной схеме шихтовки.

Магнитопроводы, отдельные части которых изготавливают путём навивки из полос электротехнической стали, а затем скрепляют в единую систему, называют навитыми. Навитой магнитопровод, представленный на рисунке 4, обладает низким током холостого хода, который обусловлен только потерями в электротехнической стали, поскольку отсутствуют воздушные зазоры и зоны, в которых направление магнитного потока не совпадает с направлением проката стали. Но поскольку его невозможно разъединить, надевание обмоток невозможно. Приходится наматывать обмотки непосредственно на магнитопровод – это не технологично и дорого.

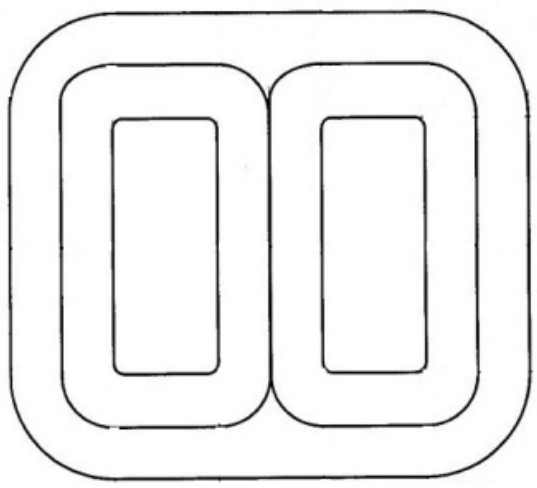

Рисунок 4 – Навитой магнитопровод

Для решения этой проблемы разработан разрезной навитой магнитопровод, приведённый на рисунке 5, у которого ярма с половиной стержня разъединены друг от друга. Это позволяет упростить сборку магнитопровода с обмотками [3].

Разрезной навитой магнитопровод при соединении имеет воздушный промежуток, находящийся в одной плоскости. Это приводит к резкому увеличению потерь, разрезной навитой магнитопровод не находит широкого применения в трансформаторостроении.

В недавнее время был разработан навитой магнитопровод типа «Unicore», изображённый на рисунке 6.

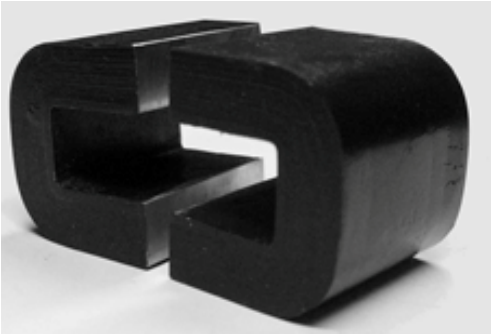

Рисунок 5 – Разрезной навитой магнитопровод

Суть технологии в том, что стыковка половин магнитопровода при сборке производится не в одной плоскости, как в разрезной технологии, а по "косой", т. е. стык между левой и правой "половинками" является не прямым, а равномерно распределенным по стержням магнитопровода, набранным из элементов различной длины.

Идея сводится к тому, что стыковочный зазор по стержням магнитопровода является распределенным, как показано на рисунке 7. В результате стало возможным получение ряда преимуществ в изготовлении и эксплуатации магитопроводов.

Магнитный поток не преодолевает препятствие в виде воздушного зазора, а минует его, используя соседние несущие ленты, которые, в свою очередь, таких препятствий в этом месте не имеют.

Такой тип конструкции магнитопровода, где толщина зазора равна толщине ленты, имеет минимальные потери и наилучшие характеристики по прочим физическим, метрологическим показателям [5].

Протекание магнитного потока при различных схемах происходит по-разному. Для шихтованной системы магнитный поток фазы «А» ($Ф_A$) замыкается через фазу «В». Магнитный поток фазы «В» ($Ф_B$) замыкается как через фазу «А», так и через фазу «С». Магнитный поток фазы «С» ($Ф_c$) замыкается через фазу «В». Отсюда следует, что через фазу «В» замыкаются все три магнитных потока, в то время как через фазы «А» и «В» потоки только двух фаз. Эта несимметрия ведёт к увеличению потерь в фазе «В».

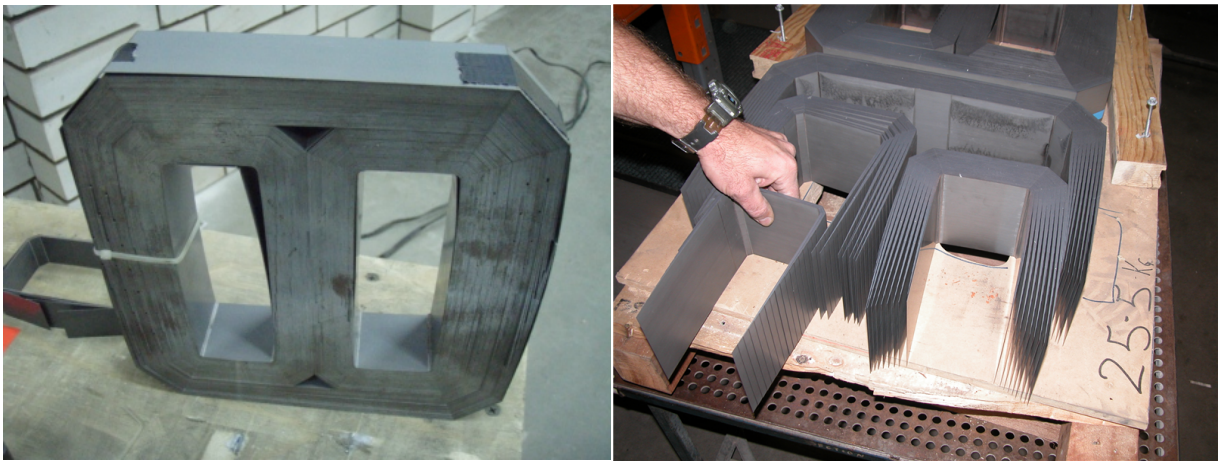

Рисунок 6 – Магнитопровод типа «Unicore»

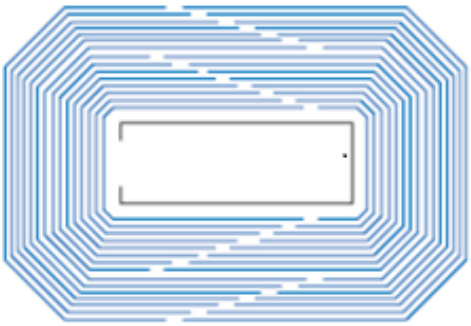

Рисунок 7 – Распределение стыкового зазора

В навитом магнитопроводе мы видим совсем другую картину. Магнитный поток фазы «А» замыкается через фазы «В» и «С». Магнитный поток фазы В замыкается через фазы «А» и «С». Магнитный поток фазы «С» замыкается через фазу «А» и «В». Через каждый стержень замыкается магнитный поток трёх фаз. Это даёт равномерное распределение плотности магнитного потока. Распределение магнитного потока хорошо видно из рисунка 8.

В зависимости от магнитной индукции в магнитопроводе потери холостого хода могут резко изменяться. Основная рабочая индукция трансформаторов – 1,7 Тл; с данной индукцией работает большинство общепромышленных распределительных трансформаторов. Для энергосберегающих трансформаторов рабочая индукция составляет 1,5 Тл. Данная индукция выбрана из-за того, что эти точки являются критическими для холоднокатаной анизотропной электротехнической стали, после них происходит резкое увеличение удельных потерь в стали. Это всё характерно для шихтованных магнитопроводов. Для навитых магнитопроводов картина не ясна, так как не произведено исследований в данной области. Большинство производителей навитых магнитопроводов используют индукцию, характерную для шихтованных магнитопроводов.

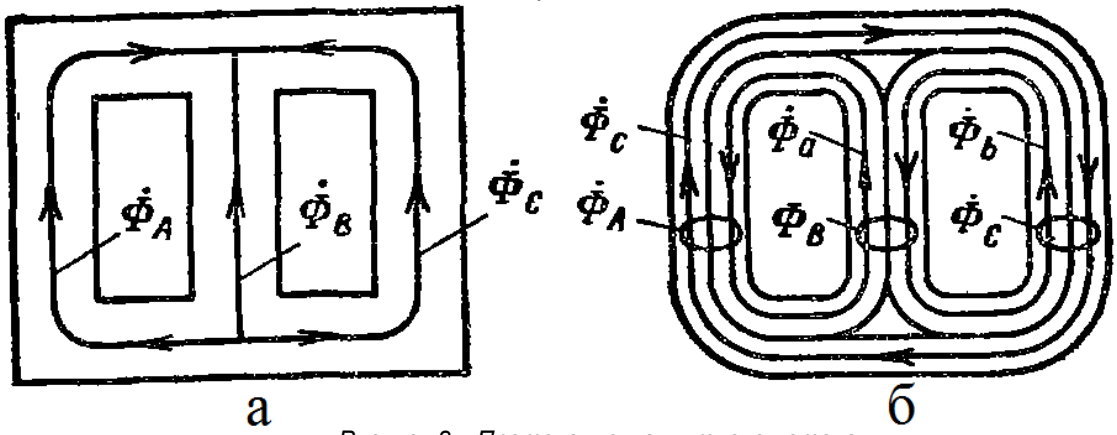

Рисунок 8 – Протекание магнитного потока:
а – по шихтованной системе;
б – по навитой системе

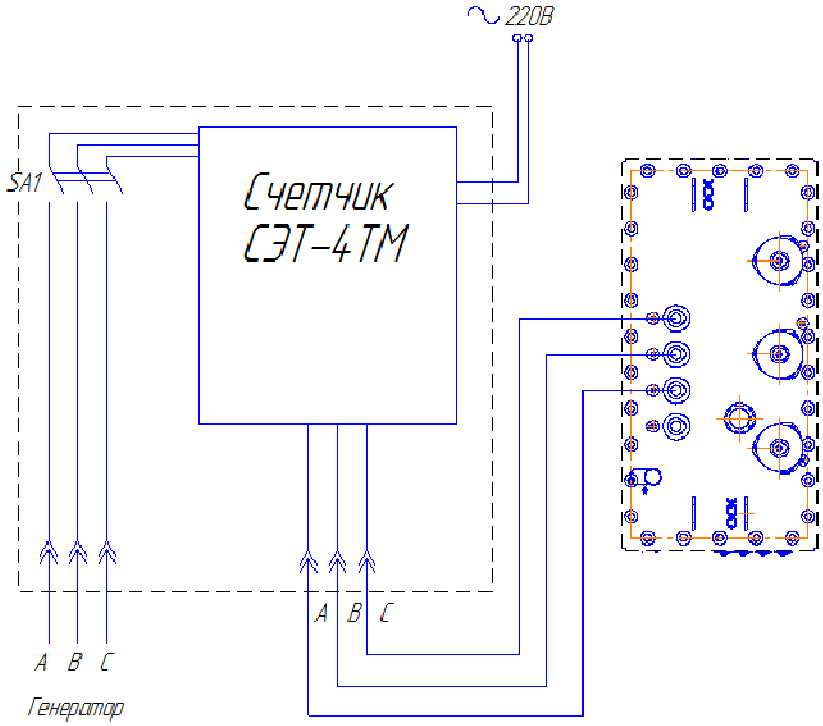

Рисунок 9 – Схема проведения испытаний

Для исследования влияния магнитной индукции на удельные потери в стали магнитопровода были произведены замеры на трансформаторах с системой шихтовки «Step-lap» и «Unicore». Испытания трансформатора проводились с использованием счётчика электрической энергии многофункционального СЭТ-4ТМ.

Изменение потребления активной электроэнергии трансформатором фиксировалось при подаче напряжения, начиная с 300 В с шагом 10 В до достижения значения тока 10 А или напряжения 500 В. Схема подключения счётчика к трансформатору показана на рисунке 9.

Для расчёта удельных потерь в трансформаторе требуется рассчитать магнитную индукцию в магнитопроводе трансформатора. Индукция рассчитана по формуле:

$$B = \frac{U}{\sqrt{3} * 222 * \omega * S},$$

где B – индукция в стержне;

U – Напряжение;

ω – количество витков;

S – площадь сечения магнитопровода.

Для расчёта удельных потерь измеренные потери соотносятся к массе магнитопровода [1].

Для исследования были использованы четыре трансформатора: трансформатор мощностью 100 кВА с системой шихтовки «Unicore», трансформатор мощностью 160 кВА с системой шихтовки «Unicore», трансформатор мощностью 160 кВА с системой шихтовки «Step-lap», трансформатор мощностью 250 кВА с системой шихтовки «Step-lap».

Данные измерений и расчётов для трансформатора мощностью 100 кВА с системой шихтовки «Unicore» представлены в таблице 1.

Данные измерений и расчётов для трансформатора мощностью 160 кВА с системой шихтовки «Unicore» представлены в таблице 2. Данные измерений и расчётов для трансформатора мощностью 160 кВА с системой шихтовки «Step-lap» представлены в таблице 3. Данные измерений и расчётов для трансформатора мощностью 250 кВА с системой шихтовки «Step-lap» представлены в таблице 4.

Для оценки результатов измерений построены графики зависимости удельных потерь от индукции. На графике, представленном на рисунке 10, сравниваются трансформаторы мощностью 160 кВА с системой шихтовки «Unicore» и «Step-lap». Третьей кривой графика является изменение удельных потерь по каталогу. На графике хорошо видно, что при индукции ниже 1,7 Тл трансформатор с системой шихтовки «Step-lap» обладает меньшими удельными потерями. При дальнейшем увеличении индукции ситуация меняется: преимущество появляется у системы

шихтовки «Unicore». Так при индукции 1,5 Тл удельные потери «Step-lap» ниже «Unicore» – около 0,1 Вт/кг, а при индукции 1,7 Тл удельные потери «Unicore» ниже «Step-lap». При массе магнитопровода 400 кг изменение удельных потерь в 0,1 Вт/кг изменит потери на 40 Вт.

Таблица 1 – Трансформатор мощностью 100 кВА «Unicore»

1	Напряжение, В	330,6	340,5	348,1	359,9	367,7	381,8
2	Индукция, Тл	1,39	1,43	1,46	1,51	1,55	1,60
3	Потери ХХ, Вт	145,6	155,0	163,0	175,6	185,3	203,4
4	Удельные потери, Вт/кг	0,92	0,98	1,03	1,11	1,17	1,29
1	Напряжение, В	387,6	401,3	409,6	419,7	431,1	442,6
2	Индукция, Тл	1,63	1,69	1,72	1,76	1,81	1,86
3	Потери ХХ, Вт	212,5	234,6	251,5	276,2	310,4	354,3
4	Удельные потери, Вт/кг	1,35	1,49	1,59	1,75	1,97	2,24

Таблица 2 – Трансформатор мощностью 160 кВА «Unicore»

1	Напряжение, В	386,2	397,8	406,6	416,5	429,8	435,4
2	Индукция, Тл	1,40	1,44	1,47	1,51	1,56	1,58
3	Потери ХХ, Вт	321,2	344,4	363,6	383,5	419,6	434,5
4	Удельные потери, Вт/кг	0,99	1,06	1,12	1,18	1,29	1,33
1	Напряжение, В	446,6	456,6	465,0	475,9	486,4	497,2
2	Индукция, Тл	1,62	1,66	1,69	1,72	1,76	1,80
3	Потери ХХ, Вт	469,5	506,4	542,3	595,8	657,6	733,8
4	Удельные потери, Вт/кг	1,44	1,55	1,66	1,83	2,02	2,25

Таблица 3 – Трансформатор мощностью 160 кВА «Step-lap»

1	Напряжение, В	317,7	330,1	336,9	345,6	359,3	368,8
2	Индукция, Тл	1,35	1,40	1,43	1,47	1,52	1,56
3	Потери ХХ, Вт	194,3	213,3	222,0	240,8	270,9	291,8
4	Удельные потери, Вт/кг	0,83	0,91	0,94	1,02	1,15	1,24
1	Напряжение, В	376,5	385,6	400,6	411,0	415,7	425,1
2	Индукция, Тл	1,60	1,64	1,70	1,74	1,76	1,80
3	Потери ХХ, Вт	313,2	340,8	400,2	464,7	494,0	547,3
4	Удельные потери, Вт/кг	1,33	1,45	1,70	1,98	2,10	2,33

Таблица 4 – Трансформатор мощностью 250 кВА «Step-lap»

1	Напряжение, В	317,7	330,1	336,9	345,6	359,3	368,8
2	Индукция, Тл	1,35	1,40	1,43	1,47	1,52	1,56
3	Потери ХХ, Вт	194,3	213,3	222,0	240,8	270,9	291,8
4	Удельные потери, Вт/кг	0,83	0,91	0,94	1,02	1,15	1,24
1	Напряжение, В	376,5	385,6	400,6	411,0	415,7	425,1
2	Индукция, Тл	1,60	1,64	1,70	1,74	1,76	1,80
3	Потери ХХ, Вт	313,2	340,8	400,2	464,7	494,0	547,3
4	Удельные потери, Вт/кг	1,33	1,45	1,70	1,98	2,10	2,33

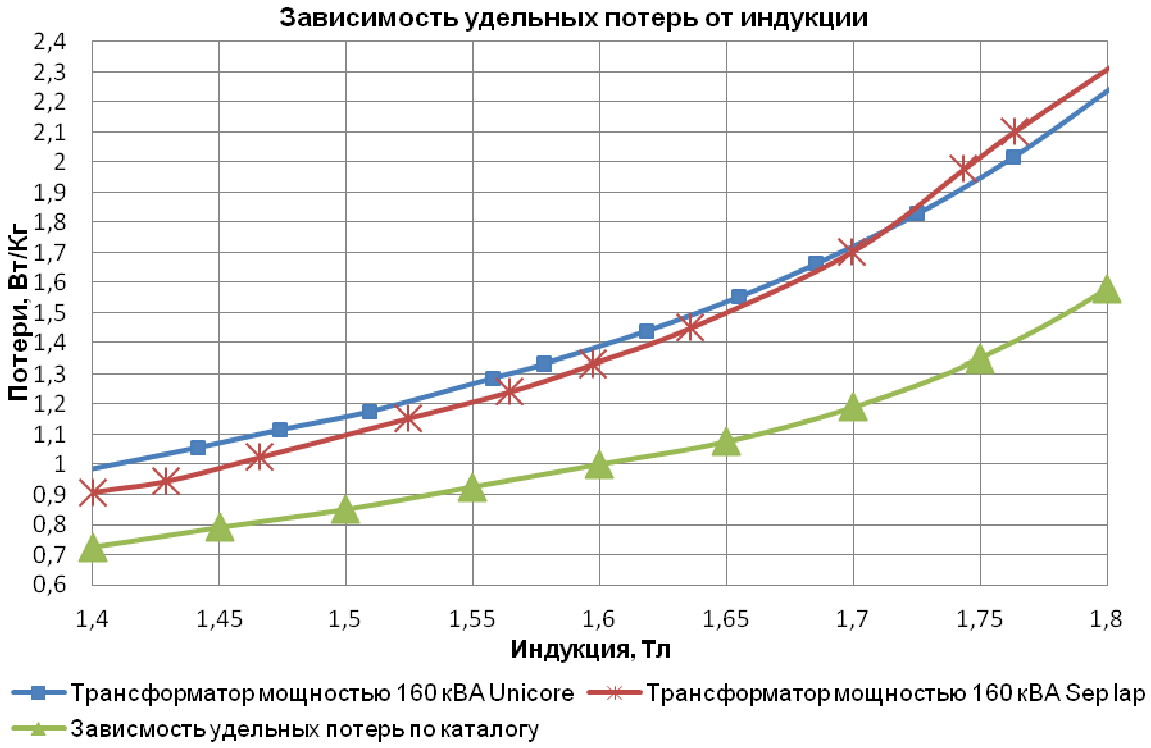

Рисунок 10 – График зависимости удельных потерь от индукции

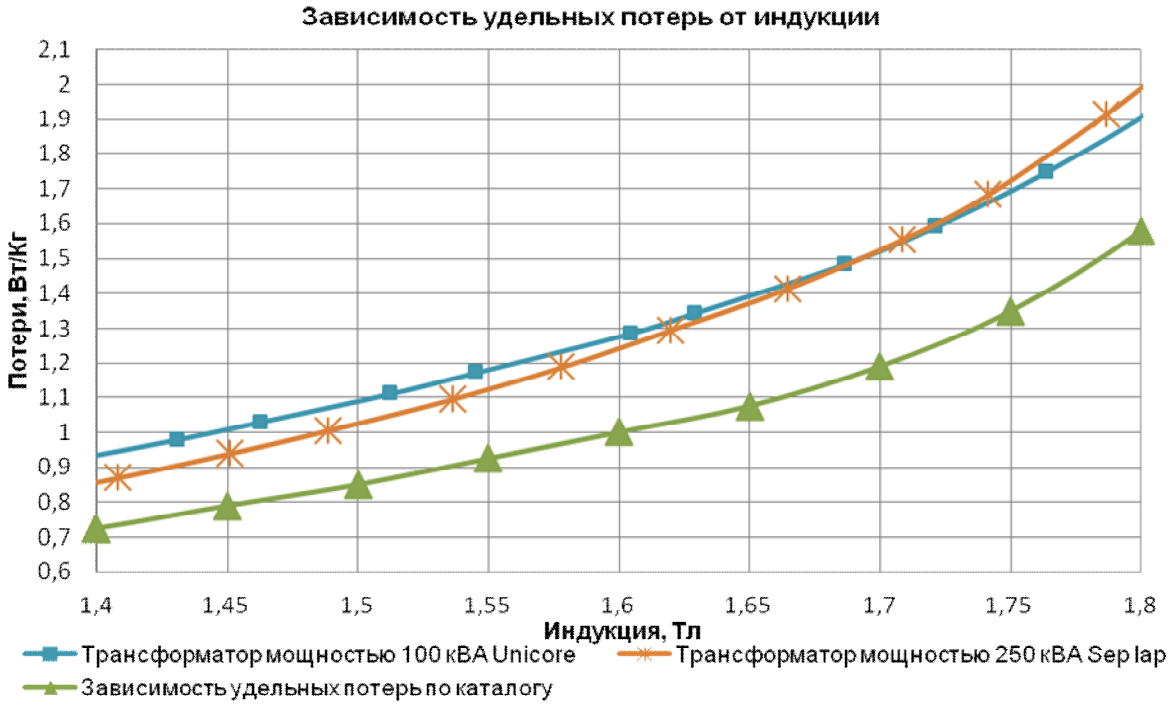

Рисунок 11 – График зависимости удельных потерь от индукции

Из обоих графиков мы видим, что отношение удельных потерь к индукции в трансформаторе зависит не от мощности трансформатора, а от схемы шихтовки магнитопровода. График зависимости, предоставленный производителем электротехнической стали, лежит значительно ниже измеренных данных. Это обусловлено тем, что произво-

дитель может оценить только потери, которые возникают в самом материале. Потери в магнитопроводе состоят не только из потерь в материале. Также большое влияние оказывают добавочные потери в магнитопроводе. Добавочные потери в шихтованных магнитопроводах состоят из потерь в воздушных промежутках и потерь, возникающих при несовпадении направления воздушного потока с направлением проката электротехнической стали. Анализируя графики потерь при схеме шихтовки «Step-lap» и «Unicore», становится ясно, что в этих магнитопроводах имеют место разные добавочные потери. Для учёта добавочных потерь при шихтовке «Step-lap» существуют руководящие документы. Для учета добавочных потерь при шихтовки «Unicore» нет достоверных теорий. Для разработки данной теории нужно провести большее количество экспериментов, необходимых для оценки потерь холостого хода в трансформаторах с системой шихтовки «Unicore».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов [Текст]: учеб. пособие для вузов – 5-е изд., и доп. / П. М. Тихомиров. – М. : Энергоатом-издат, –1986. – 528 с.: ил.

2. Лизунова, С. Д. Силовые трансформаторы [Текст]: справочная книга / С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. – М. : Энергоиздат, 2004. – 616 с.

3. Дубатов, Б . П. Производство трансформаторов до 630 кВА [Текст] / Б . П. Дубатов, С. И. Рабинович. – М. : Энергия, 1997. – 112 с.: ил.

4. Сергеенков, Б. Н. Электрические машины: Трансформаторы [Текст]: учеб. пособие для электромех. спец. вузов / Б. Н. Сергеенков, В. М. Киселёв, Н. А. Акимова; под ред. И. П. Копылова. – М. : Высш.шк., – 1989. – 352 с.: ил.

5. Морозов, Ю. В. Новая технология Unicore для изготовления магнитопроводов / Ю. В. Морозов // Компоненты и технологии. – 2006. – № 8.

***Багаев К. И.**, магистрант, E-mail: konstantin-spark@mail.ru., Россия, Алтайский край, г. Барнаул, ФГУБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий».*