

**III Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

208-1

**12-14 ноября 2020 года**

---

**УДК 621.314.222**

С.Д. ЗАГУЛЯЕВ, ведущий инженер  
(«23 ГМПИ-филиал АО «31 ГПИСС»)  
г. Санкт-Петербург

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ СИЛОВОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ  
ОБМОТОК ОТНОСИТЕЛЬНО МАГНИТОПРОВОДА**

Силовые трансформаторы весьма широко применяются в электроэнергетике. Электроэнергия по пути от электростанции до потребителя преобразуется в них несколько раз. При этом каждое преобразование сопровождается некоторыми потерями. Поэтому снижение потерь в трансформаторах представляется актуальным вопросом.

Одним из видов потерь в трансформаторах являются потери в стали (магнитные потери). Они определяются величиной магнитной индукции в магнитопроводе. Магнитный поток трансформатора можно разложить на основной магнитный поток, который замыкается по магнитопроводу и пронизывает витки первичной и вторичной обмоток, и потоки рассеяния отдельных обмоток, которые замыкаются частично по воздуху, поэтому магнитопровод они нагружают избирательно [1]. В итоге распределение магнитной индукции по длине магнитопровода определяется наложением магнитных потоков рассеяния отдельных обмоток и основного магнитного потока [2].

При работе трансформатора под нагрузкой потоки рассеяния разгружают магнитопровод. Чем меньше магнитная индукция в магнитопроводе, тем меньше будут потери в стали. Например, работы [3, 4], в которых достигается изменение намагничающего тока под нагрузкой из-за влияния полей рассеяния, свидетельствуют об изменении загрузки магнитопровода по его длине.

Как правило в силовых трансформаторах напряжением 10/0,4 кВ применяют концентрические обмотки, а первичная (высоковольтная) располагается снаружи (далее от магнитопровода). Так легче обеспечить ее изоляцию от магнитопровода [5].

Возможно и другое расположение обмоток, первичную (высоковольтную) можно расположить ближе к магнитопроводу. Как это скажется на работе трансформатора? Является ли стандартное исполнение трансформатора оптимальным с точки зрения работы трансформатора?

Для ответа на эти вопросы было проведено исследование, цель которого определить распределение магнитных потоков рассеяния

### III Всероссийская (с международным участием) молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

208-2

12-14 ноября 2020 года

трансформатора при работе под нагрузкой, их влияние на загруженность магнитопровода и на потери в стали при традиционном расположении обмоток и в случае размещения первичной (высоковольтной) обмотки ближе к магнитопроводу.

В качестве объекта исследования был выбран переделанный однофазный сварочный трансформатор ТДМ-317. От трансформатора был использован магнитопровод. Сварочные трансформаторы имеют повышенное рассеяние магнитного поля, что облегчит исследование распределения полей рассеяния. Марка стали 3414. Толщина пластин сердечника 0,35мм.

Обмотки концентрические. Для проведения опытов применялись два комплекта обмоток. В первом комплекте первичная обмотка внутренняя (ближняя к магнитопроводу), вторичная внешняя (далняя от магнитопровода). А во втором комплекте – наоборот. Первичную обмотку выполнили алюминиевым проводом сечением 13,3  $\text{мм}^2$ , число витков 186. Вторичная обмотка имела 32 витка алюминиевого провода сечением 75  $\text{мм}^2$ .

По всей длине магнитопровода с расстоянием в 5-10 см друг от друга были размещены витки провода – датчики магнитной индукции.

Схема для проведения испытаний приведена на рис. 1, где Тр<sub>1</sub> – исследуемый трансформатор, R<sub>6</sub> – нагрузка (балластный реостат), ТТ<sub>1</sub> и ТТ<sub>2</sub> – трансформаторы тока с подключенными амперметрами и ваттметрами, V<sub>1</sub> и V<sub>2</sub> – вольтметры.

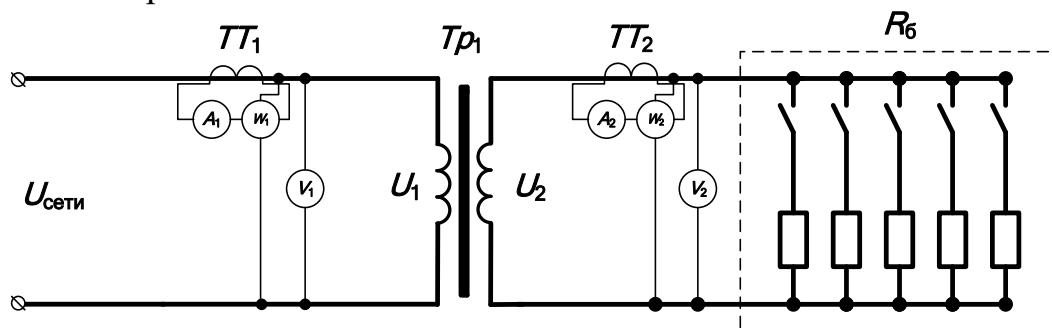


Рис. 1. Схема для проведения исследования

Схема для измерения магнитной индукции приведена на рис. 2, где Тр<sub>1</sub> – исследуемый трансформатор, U – вольтметр магнитоэлектрической системы с диодным мостом, S1 – переключатель, R<sub>6</sub> – нагрузка, 1...5 – индукционные датчики.

Порядок проведения опытов следующий:

1. Исследуемый трансформатор включается в режиме холостого хода. Измеряется магнитная индукция по длине магнитопровода, наибольшее из всех полученных значений принимается за 100% загрузки магнитопровода. Все последующие измерения сравниваются с этим значением.

### III Всероссийская (с международным участием) молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

208-3

12-14 ноября 2020 года

2. Трансформатор нагружается. Нагрузка подбирается так, чтобы вторичное напряжение снизилось по сравнению с режимом холостого хода на 30% для того, чтобы легче выявить распределение магнитного поля.

3.

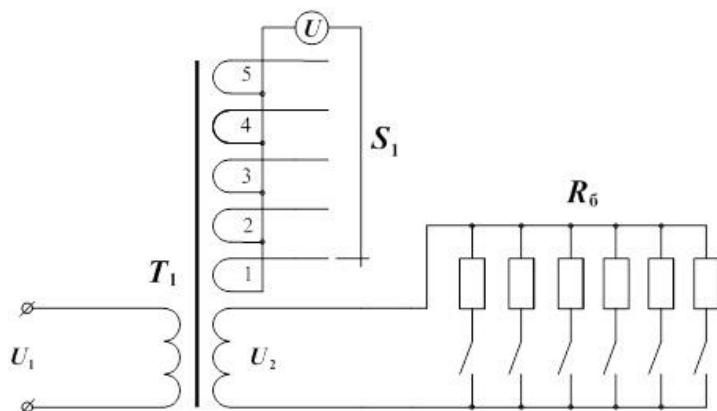


Рис. 2. Схема для измерения магнитной индукции

4. Производим измерения напряжений, токов, мощности, распределения магнитной индукции по длине магнитопровода.

5. Меняем конструкцию трансформатора, повторяем опыты.

Результаты измерений представлены на рис. 3 и 4. Области магнитопровода с высоким значением магнитной индукции затемнены, а с низким значением светлого цвета. Видно, что магнитопровод можно поделить на две области – с высоким и низким значениями магнитной индукции. Существенная разница определяется значительным рассеянием магнитного потока при работе трансформатора с нагрузкой. В случае размещения первичной обмотки ближе к магнитопроводу, протяжённость светлых участков больше, потери в стали меньше.

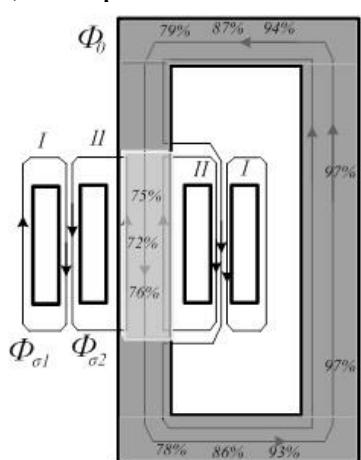


Рис. 3. Распределение магнитного поля, когда вторичная обмотка ближняя к магнитопроводу

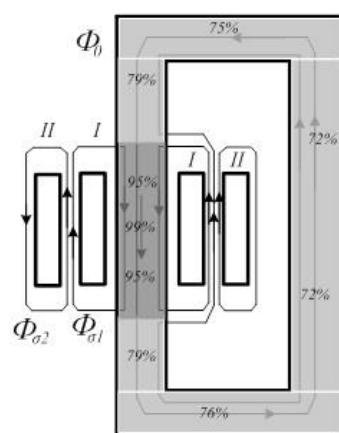


Рис. 4. Распределение магнитного поля, когда первичная обмотка ближняя к магнитопроводу

III Всероссийская (с международным участием) молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

208-4

12-14 ноября 2020 года

Для большего снижения потерь можно выровнять магнитную индукцию за счёт применения магнитопровода с сечением, завышенным в области расположения первичной обмотки (рис. 5).

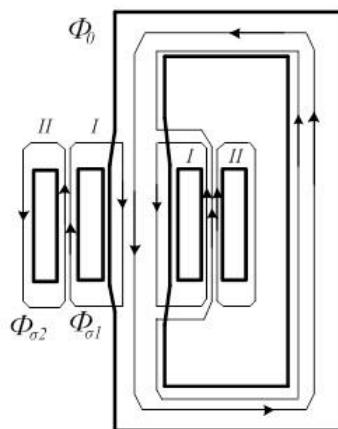


Рис. 5. Форма магнитопровода для выравнивание магнитной индукции по длине магнитопровода под нагрузкой

Оценим финансовый эффект от применения конструкции, приведённой на рис. 4 или 5, взамен традиционного расположения применительно к широко применяемому трансформатору ТМ-630 кВА.

При работе на номинальную нагрузку вторичное напряжение снижается на величину напряжения короткого замыкания. В рассматриваемом трансформаторе напряжение снизится на 5,5%, что повлечет уменьшение магнитной индукции в районе вторичной обмотки с 1,7 Тл до 1,6 Тл (на 0,1 Тл). По зависимости удельных потерь в стали 3413 от амплитудного значения магнитной индукции при синусоидальной магнитной индукции частотой 50 Гц (справочные данные), ясно, что снижение удельных потерь в стали произойдет с 1,9 Вт/кг до 1,55 Вт/кг.

Так как изменения произойдут только в области расположения вторичной обмотки (примерно половина длины магнитопровода), то для расчёта снижения потерь данное значение нужно поделить пополам.

В трансформаторе ТМ-630 потери холостого хода 1300 Вт. Снижение потерь при массе магнитопровода 600 кг составит 105 Вт (8,0%). Учитывая, что в электроэнергетике применяется большое количество силовых трансформаторов, финансовый эффект может быть значительным.

Выводы.

При работе трансформатора с концентрическими обмотками под нагрузкой взаимное расположение первичной и вторичной обмоток относительно магнитопровода определяет различное насыщение отдельных участков магнитопровода. Наиболее неблагоприятный результат у

### III Всероссийская (с международным участием) молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

208-5

12-14 ноября 2020 года

---

трансформатора с внешней первичной обмоткой. Именно такое расположение обмоток применяют в силовых трансформаторах.

Распределение магнитной индукции по магнитопроводу значительно лучше с первичной обмоткой ближе к магнитопроводу. При этом в середине обмотки магнитная индукция наибольшая. Возможно полностью исключить зону с повышенной магнитной индукцией, если магнитопровод в этом месте выполнить с увеличенным сечением.

Исследование определило линейное распределение магнитной индукции по длине магнитопровода. При этом не было учтено, что потоки рассеяния создают потоки поперёк укладки листов анизотропной электротехнической стали, а в этом направлении сталь работает существенно хуже. Учёт анизотропности магнитопровода требует дополнительного исследования.

#### Список литературы:

1. Гуков Д.В., Бычкова О.С., Александров Е.А. Трансформатор со сниженным намагничивающим током при работе под нагрузкой // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях. Труды V межвузовской научно-практической конференции. – СПб.: ВАС, 2020. – с. 446-448.
2. Gukov D.V., Ivankov S.M., Zagulyaev S.D. Reduction of magnetizing current of power transformer due to optimal location of concentric windings // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon): IEEE Conference publication. – Vladivostok, Russia: IEEE, 2018.
3. Гуков Д.В., Загуляев С.Д. Возможности снижения сечения магнитопровода силовых трансформаторов за счет учета падения напряжения на индуктивности рассеяния первичной обмотки // 3 межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях»: Труды конференции, Том 2. – СПб.: ВАС, 2018. – С. 76-80.
4. Гуков Д.В., Загуляев С.Д., Прищепа Д.Н. Повышение энергоэффективности силовых трансформаторов за счет снижения магнитных потерь // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – 2018. – Выпуск 663. – с. 65-70.
5. Копылов И. П. Электрические машины: учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. – М.: Высшая школа; Логос, 2000. – С. 165.

#### Информация об авторе:

**III Всероссийская (с международным участием) молодежная  
научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

208-6

**12-14 ноября 2020 года**

---

Загуляев Сергей Дмитриевич, ведущий инженер, «23 ГМПИ-филиал  
АО «31 ГПИСС», 191167, г. Санкт-Петербург, ул. Атаманская, д. 6, zagul-  
yaev.sd@yandex.ru