

ПОТЕРИ В СЕТЕВЫХ И ЗВУКОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

канд. техн. наук, доц. Д. А. ДОВГЯЛО, В. А. ТИХОНОВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

канд. физ.-мат. наук, доц. К. Х. БАБАМУРАТОВ
(Термезский инженерно-технологический институт, Узбекистан)

Описаны причины возникновения потерь в трансформаторах. Выявлены основные виды потерь энергии в трансформаторе. Рассмотрены понятия добротности и коэффициента полезного действия. Дана оценка прохождения сигналов звуковой частоты, рассмотрены принципы и правила построения частотной характеристики. Даны рекомендации для проектирования трансформаторов звуковой и сетевой частоты. Рассмотрены конструктивные меры по снижению потерь. Приведенные данные могут использоваться для проектирования сетевых и звуковых трансформаторов.

Ключевые слова: трансформаторы, потери в трансформаторах, гистерезис, коэффициент полезного действия, трансформаторы сетевые, трансформаторы звуковой частоты.

В трансформаторе, работающем в том числе на повышенных частотах (звуковые и более высокие частоты), существуют потери, которые определяют его коэффициент полезного действия (КПД) и перегрев. В зависимости от режима работы трансформатора, его конструкции и схемы соединения обмоток величина отдельных составляющих потерь может изменяться в широких пределах, и пренебрежение какой-либо из них может привести к самым нежелательным последствиям. Чтобы правильно спроектировать трансформатор, необходимо оценить величину всех составляющих потерь и определить причины их возникновения [1].

Для оценки качества трансформаторов в большинстве случаев используется добротность и КПД. Под добротностью понимают отношение реактивной энергии, запасенной в трансформаторе, к активной. Общее выражение добротности системы [2]

$$Q = \frac{\omega L}{R} \left[1 - \omega^2 LC + \frac{\omega^2 L^2}{r(1 - \omega^2 LC)} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где R , L , C – соответственно сопротивление, индуктивность и собственная емкость обмотки;
 ω – угловая частота, с^{-1} ;
 r – сопротивление потерь в магнитопроводе и в диэлектрике: $r = R_c R_d (R_c + R_d)$,

где R_c – сопротивление потерь в магнитопроводе: $R_c = \frac{U^2}{P_c}$,

где U – рабочее напряжение;
 P_c – мощность потерь в магнитопроводе;

R_d – сопротивление потерь в диэлектрике: $R_d = \frac{U^2}{P_d}$,

где P_d – мощность потерь в диэлектрике.

Из выражения (1) видно, что добротность может значительно зависеть от параметров материала изоляции обмоток и магнитных свойств магнитопровода.

Коэффициент полезного действия показывает, какая часть энергии, потребляемой из электрической сети, передается в нагрузку [3]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{эл} + P_{ст}} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{эл} + P_{ст}} = \frac{U_2 \frac{I_{2н}}{I_{2н}} I_2 \cos \varphi_2}{U_2 \frac{I_{2н}}{I_{2н}} I_2 \cos \varphi_2 + P_{эл} + P_{ст}} \approx$$

$$\approx \frac{\beta S_n \cos \varphi_2}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_{xx}},$$

где $S_n = U_2 I_n$ – номинальная полная мощность, ВА;

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1н}} \approx \frac{I_2}{I_{2н}} \text{ – коэффициент нагрузки;}$$

P_k – номинальные потери в обмотках, измеренные ваттметром, Вт;

P_2 – электрическая мощность вторичной обмотки, Вт;

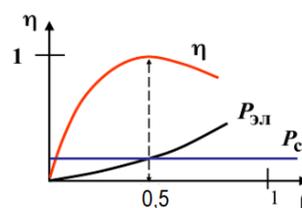
$P_{xx}, P_{ст}$ – потери в стали, Вт;

φ_2 – угол между вектором активной мощности и полной выходной мощности;

$P_{эл} = \beta^2 P_k$ – электрические потери, Вт.

КПД будет достигать максимума при равенстве переменных электрических потерь постоянным магнитным потерям. Так, при токе нагрузки 50–70% от номинальной величины КПД достигает максимального значения (рисунок 1) [4].

Рисунок 1. – Максимум КПД трансформатора



В трансформаторе можно выделить следующие виды потерь:

- в магнитопроводе на вихревые токи и на перемагничивание;
- в проводах первичной обмотки;
- в проводах вторичных обмоток;
- в диэлектрике (изоляции);
- из-за эффекта магнестрикционного резонанса;
- из-за эффекта объемного резонанса;
- из-за полей рассеяния.

Одним из факторов, ограничивающих выбор рабочей индукции при проектировании трансформаторов любого типа, является допустимая величина потерь в магнитопроводе, которая определяется температурой его перегрева. Полная величина потерь в магнитопроводе [5]

$$P_{ст} = p_{уд} V_c,$$

где $p_{уд}$ – удельные потери в стали, Вт/кг;

V_c – объем сердечника, м³.

Для трансформаторов, работающих в определенной полосе частот при неизменной величине входного тока, потери будут наибольшими на низшей частоте. Отсюда следует, что допустимая величина потерь в магнитопроводе должна соответствовать нижней частоте рабочего диапазона.

Потери на вихревые токи. Сталь имеет низкое омическое сопротивление, поэтому вихревые токи достигают значений сотен и тысяч ампер. Как следствие, часть энергии электромагнитного поля созданного первичной обмоткой трансформатора, преобразуется в тепловую энергию, вызывая разогрев магнитопровода. Для уменьшения вихревых токов необходимо увеличить значение омического сопротивления сердечника, что достигается набором сердечника из изолированных пластин [6].

Чем тоньше пластина (лента), тем выше ее сопротивление и меньше вихревые токи. В зависимости от рабочей частоты применяют различную толщину пластин. Между силовыми линиями тока компенсируются, в результате вихревой ток протекает только по периметру (рисунок 2).

Потери на вихревые токи пропорциональны квадрату частоты, квадрату толщины и весу сердечника [7]:

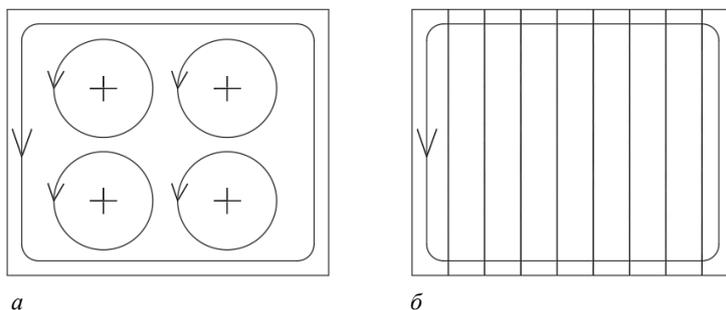
$$P_v = f_c^2 \Delta^2 G, \tag{2}$$

где f_c – частота, Гц;

Δ – толщина сердечника, м;

G – вес сердечника, кг.

Из выражения (2) следует, что на высоких частотах целесообразно использовать очень тонкие материалы.



а – в сечении цельного магнитопровода;
б – в сечении магнитопровода, собранного из пластин или навитого из ленты

Рисунок 2. – Вихревые токи в магнитопроводе

Потери на перемагничивание. При уменьшении электромагнитного поля до нуля домены частично сохраняют свою ориентацию, что, в свою очередь, обуславливает остаточную намагниченность. Энергия (H_c), затраченная на снятие остаточной намагниченности, и характеризует данный вид потерь [7]. При этом также выделяется тепло и сердечник разогревается. Потери на перемагничивание пропорциональны площади петли гистерезиса (рисунок 3), частоте напряжения сети (f_c) и весу (G) сердечника:

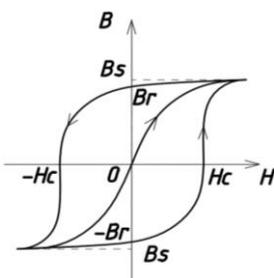


Рисунок 3. – Петля гистерезиса: B_s – индукция насыщения, H_c – коэрцитивная сила, B_r – остаточная индукция

При проектировании трансформаторов следует учитывать, что в разрезных магнитопроводах значения удельных потерь будут существенно большими, чем значения, полученные непосредственно для материала магнитопровода. Это объясняется тем, что при резке магнитопроводов на торцах их половин образуются переемычки, которые накоротко замыкают отдельные пластины. Таким образом, в готовом магнитопроводе имеются четыре сплошные площадки (по числу торцевых поверхностей половин) с площадью, равной сечению магнитопровода, и толщиной, в среднем соответствующей толщине ленты. В некоторых случаях эти переемычки удаляют путем шлифовки торцов или их травления, тем самым снижая потери [8].

Потери в диэлектрике. Под этим видом потерь понимаются потери в изоляции, которые суммируются из диэлектрических потерь сквозной проводимости и ионизационных потерь.

При протекании переменного тока по обмоткам в витковой изоляции возникает переменное электрическое поле. Электрическое поле в диэлектрических материалах вызывает токи смещения, которые будут тем больше, чем больше напряженность и частота электрического поля. Из-за явления поляризации и присутствия проводимости, пусть и незначительной, в диэлектрике выделяется тепловая энергия.

Ионизационные потери наиболее характерны для высоковольтных трансформаторов и пренебрежимо малы в классе рассматриваемых в рамках данной работы сетевых и звуковых трансформаторов.

Диэлектрические потери имеют весьма малую долю в числе общих потерь, при проектировании трансформаторов их величиной можно пренебречь.

Диэлектрические потери в объеме диэлектрического материала (в изоляции обмотки) определяются как [8]

$$P_d = 4\pi f \operatorname{tg} \delta W_d,$$

где f – частота, Гц;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

W_d – энергия поля в заданном объеме изоляции, Дж.

Потери в проводах обмоток определяются активным сопротивлением проводника (тепловое воздействие рабочего электрического тока), наличием уравнивающего тока (при параллельном соединении плеч обмотки, находящихся в разных слоях), потерями, возникающими из-за вихревых токов, которые наводятся полями рассеяния.

Активное сопротивление проводника обмотки определяется материалом, температурой и частотой проходящего тока. Сопротивление проводника в зависимости от температуры [9]

$$R_T = R_0(1 + \alpha T),$$

где R_T и R_0 – соответственно сопротивления провода при рабочей температуре T и при нормальных температурных условиях (25 ± 10 °С) окружающей среды;

α – температурный коэффициент сопротивления, показывающий насколько увеличивается сопротивление провода в долях при увеличении температуры на один градус.

При увеличении частоты происходит рост сопротивления обмоток за счет вытеснения тока во внешнюю зону сечения провода.

Потери из-за эффекта магнитострикционного резонанса значительно проявляются в трансформаторах, имеющих большие размеры, т. е. в трансформаторах большой мощности. Магнитострикционный резонанс происходит из-за увеличения тангенса угла диэлектрических потерь, а увеличение температуры данный эффект усугубляет.

Частота магнитострикционного резонанса определяется по формуле [2]

$$f_m = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{E_p}{\rho}} \sqrt{1 + n_p^2},$$

где R – средний радиус тороидального магнитопровода;

E_p – модуль Юнга;

ρ – плотность образца;

n_p – число волн, укладываемых по длине образца.

Объемный резонанс в магнитопроводе возникает из-за больших значений величин диэлектрической и магнитной проницаемости материалов. В данном случае сердечник играет роль «резонатора», заполненного средой с определенными параметрами диэлектрической и магнитной проницаемости. Электромагнитная волна, возникающая в магнитопроводе вследствие наличия проводимости, затухает. Однако, когда длина волны близка к удвоенному значению размеров поперечного сечения, могут возникать стоячие волны, что приводит к увеличению мощности, рассеиваемой в магнитопроводе [8].

С ростом частоты в магнитопроводе увеличиваются диэлектрические потери и потери на вихревые токи, изменяется индуктивная составляющая, в большей степени проявляются емкостные свойства. Сложность электрического расчета трансформаторов звукового и ультразвукового диапазона частот заключается в необходимости учитывать влияние распределенных паразитных параметров обмоток на ход фазовых и частотных характеристик [9].

При проектировании трансформаторов звуковой частоты от $f_n = 20$ Гц до $f_n = 20000$ Гц обеспечить линейность сигнала и требуемый коэффициент трансформации во всем диапазоне частот представляется трудной задачей. При анализе частотных свойств звукового трансформатора ведут построение частотной характеристики. Для снятия частотной характеристики производится измерение выходного напряжения (либо выделяемой мощности на нагрузке) в диапазоне частот $(0,7 \div 1,3) \cdot f_n$. В качестве источника используется стабилизированное питание с регулируемой частотой. Частотную характеристику следует снимать при наименьшем рабочем напряжении первичной обмотки, т. к. при этом индуктивность последней будет наименьшей.

При проектировании типового сетевого (50 Гц) трансформатора следует учитывать следующие обстоятельства:

1. Из экономических соображений (минимизации массы сердечника и обмоточного провода), выбирается такой режим работы тороидального трансформатора, при котором амплитуда магнитной индукции несколько меньше индукции насыщения [10]. Для типовых, применяемых в промышленности, марок трансформаторной стали индукция не должна превышать 1,5–1,85 Тл.

2. Снижение положения рабочей точки магнитной индукции приводит к уменьшению тока холостого хода и, соответственно, потерь на нагрев магнитопровода и перемагничивание. Однако следует учитывать, что снижение рабочей индукции приводит к увеличению материалоемкости трансформатора и, как следствие, к увеличению его стоимости [2].

3. Применение неотожженного сердечника (для тороидального исполнения) приводит к уменьшению линейности рабочего тока и увеличению тока холостого хода за счет ухудшения проницаемости стали из-за остаточной деформации вследствие навивки трансформаторной стали на оправку.

4. Использование разрезного сердечника с немагнитным зазором также влечет за собой повышение тока холостого хода. Это тоже приводит к увеличению стоимости изделия. Увеличение тока холостого хода происходит за счет создания большой напряженности поля в немагнитном зазоре.

5. Диэлектрические потери в изоляции магнитопровода, изоляции обмоточного провода, межслоевой и межобмоточной изоляции пренебрежимо малы и при расчетах, как правило, не учитываются.

6. Для минимизации вихревых токов в магнитопроводе рекомендуется применять электротехническую трансформаторную сталь толщиной 0,3–0,5 мм (изолированные друг от друга пластины или трансформаторную ленту с изолирующим слоем) [6].

7. Для уменьшения потерь на перемагничивание следует использовать электротехническую трансформаторную сталь с высокой магнитной проницаемостью, низкой коэрцитивной силой, узкой петлей гистерезиса, высоким удельным электрическим сопротивлением (для снижения потерь на нагрев сердечника вследствие эффекта вихревых токов).

8. Для минимизации потерь в обмоточных проводах применяются проводники с высокой проводимостью – медные и алюминиевые. Наибольшие потери, как правило, возникают за счет активного сопротивления обмоточного провода. Применение алюминиевых проводников позволяет существенно снизить стоимость и уменьшить вес трансформатора.

9. Для борьбы с эффектом магнострикционного резонанса следует применять пропитку трансформаторов компаундами либо лаками. Самым эффективным способом считается полная заливка трансформатора эпоксидным компаундом.

При проектировании звукового трансформатора следует учитывать:

1. Толщина трансформаторной стали зависит от рабочей частоты проектируемого звукового трансформатора. Соответственно, следует применять [9]:

- при рабочих частотах до 200–400 Гц – сталь толщиной 0,3 мм;
- при рабочих частотах до 1000 Гц – сталь толщиной 0,08–0,15 мм;
- при рабочих частотах до 5000 Гц – сталь толщиной 0,08 мм;
- при рабочих частотах до 20000 Гц – сталь толщиной 0,05 мм.

2. Звуковые трансформаторы согласуют низкоомную нагрузку (громкоговоритель) с источником сигнала (например, звуковым усилителем). Входное сопротивление трансформатора должно быть большим, чего можно достичь за счет увеличения индуктивности входной обмотки.

3. Ток холостого хода должен быть минимальным.

4. Первичные и вторичные обмотки должны быть секционированы.

5. Величина магнитной индукции выбирается по нижней границе частотного диапазона с учетом заданных величин нелинейных искажений и перегрева. Магнитная индукция с ростом частоты уменьшается прямо пропорционально.

6. Введение в сердечник немагнитного зазора существенно уменьшает нелинейные искажения, однако увеличивает потери в сердечнике.

7. Для обеспечения прохождения звукового сигнала с заданным коэффициентом трансформации во всем диапазоне частот необходимо учитывать влияние распределенных паразитных параметров обмоток.

8. Трансформаторы с тороидальными сердечниками имеют преимущество за счет возможности одновременного снижения индуктивности рассеяния и собственной емкости (при секционировании) с увеличением числа секций [9].

9. Трансформаторы с тороидальными сердечниками практически не имеют полей рассеяния при большом количестве чередующихся секций. Обмотки должны быть распределены по всему магнитопроводу равномерно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маклиман В. Проектирование трансформаторов и дросселей. Справочник. – 3-е изд., пересм. и доп.; пер. с англ. Попова В. В. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 476 с.
2. Котенёв Е. С., Евсеев А. Н. Расчет и оптимизация тороидальных трансформаторов. – М.: Горячая линия. Телеком, 2011. – 287 с.
3. Белопольский И. И. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: ЁЁ Медиа – 2018. – 161 с.
4. Быстрицкий Г. Ф., Кудрин Б. И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов. – М.: СИНТЕГ, 2015. – 176 с.
5. Ермолин, Н. П. Как рассчитать маломощный силовой трансформатор. – М.: Энергетическое издательство. – 2016. – 620 с.
6. Грунтович Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования: учеб. пособие. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М. – 2013. – 269 с.

7. Присмотрова Л. К., Пировских Е. Н., Пировских А. В. Проектирование силовых и специальных трансформаторов. – Киров: ВятГУ, 2006. – 246 с.
8. Игнатович В. М., Ройз Ш. С. Электрические машины и трансформаторы: учеб. пособие. – Томск: ТПУ, 2013. – 182 с.
9. Бальян Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. – М.: Советское радио. – 1971. – 720 с.
10. Довгяло Д. А., Янушкевич В. Ф., Тихонович В. А. Пусковые токи в тороидальных трансформаторах // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2022. – № 4. – С. 62–68. – DOI: [10.52928/2070-1624-2022-38-4-62-68](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-38-4-62-68).

REFERENCES

1. Makliman, V. (2016). *Proektirovanie transformatorov i drosslei. Spravochnik [Transformer and Inductor Design: Handbook]*. Moscow: DMK Press.
2. Kotenev, E. S. & Evseev, A. N. (2011). *Raschet i optimizatsiya toroidal'nykh transformatorov [Calculation and optimization of toroidal transformers]*. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom.
3. Belopol'skii, I. I. (2018). *Raschet transformatorov i drosslei maloi moshchnosti [Calculation of transformers and low power chokes]*. Moscow: EE Media.
4. Bystritskii, G. F. & Kudrin, B. I. (2015). *Vybor i ekspluatatsiya silovykh transformatorov [Selection and operation of power transformers]*. Moscow: SINTEG.
5. Ermolin, N. P. (2016). *Kak rasschitat' malomoshchnyi silovoi transformator [How to Calculate a Low Power Power Transformer]*. Moscow: Energeticheskoe izdatel'stvo.
6. Gruntovich, N. V. (2013). *Montazh, naladka i ekspluatatsiya elektrooborudovaniya [Installation, adjustment and operation of electrical equipment]*. Minsk: Novoe znanie; Moscow: INFRA-M.
7. Prismoetrova, L. K., Pirovskikh, E. N. & Pirovskikh, A. V. (2006). *Proektirovanie silovykh i spetsial'nykh transformatorov [Design of power and special transformers]*. Kirov: VyatGU.
8. Ignatovich, V. M. & Roiz, Sh. S. (2013). *Elektricheskie mashiny i transformatory [Electrical machines and transformers]*. Tomsk: TPU.
9. Bal'yan, R. Kh. (1971). *Transformatory dlya radioelektroniki [Transformers for radio electronics]*. Moscow: Sovetskoe radio. (In Russ.).
10. Dovgyalo, D. A., Yanushkevich, V. F., & Tikhonovich, V. A. (2022). Puskovye toki v toroidal'nykh transformatorakh [Starting currents in toroidal transformers]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 62–68. DOI: [10.52928/2070-1624-2022-38-4-62-68](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-38-4-62-68).

Поступила 06.04.2023

LOSSES IN NETWORK AND SOUND TRANSFORMERS

D. DAUHALA, V. TIKHANOVICH

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk);

K. BABAMURATOV

(Termez Institute of Engineering and Technology, Uzbekistan)

The causes of losses in transformers are described. The main types of energy losses in the transformer are revealed. The concepts of Q -factor and efficiency are considered. The estimation of the passage of audio frequency signals is given, the principles and rules for constructing frequency characteristics are considered. Recommendations for the design of sound and mains frequency transformers are given. Constructive measures to reduce losses are considered. The given data can be used for the design of network and sound transformers.

Keywords: *transformers, losses in transformers, hysteresis, coefficient of positive action, network transformers, audio frequency transformers.*