

УДК 621.318

DOI 10.52928/2070-1624-2023-41-2-56-62

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ ЧЕРЕЗ ПЕРЕКАТЫВАЮЩИЕСЯ РОЛИКИ В СОСТАВЕ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

М. Э. ВЫСОЦКИЙ, канд. техн. наук, доц. **А. С. ВЕРШИНИН**,
канд. техн. наук, доц. **Ю. Г. ГРОЗБЕРГ**
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Среди большого разнообразия преобразовательных устройств встречаются устройства для прямого преобразования механической энергии в тепловую. Они бывают различных типов, в том числе и индукционного. Одним из способов повышения эффективности преобразования в таких устройствах является исключение воздушных зазоров в коммутируемых магнитных цепях для повышения интенсивности магнитных потоков. Степень ослабления магнитного потока при прохождении его через перекатывающиеся ролики в составе магнитной цепи пока что не оценивалась, поэтому в данной работе проведена количественная оценка степени ослабления магнитного потока в разных режимах работы неразветвленной магнитной цепи, содержащей перекатывающийся роликовый элемент. Полученные зависимости позволяют судить об уровне повышения эффективности работы индукционных устройств прямого преобразования механической энергии в тепловую с указанным вариантом исключения воздушных зазоров в магнитных цепях устройства.

Ключевые слова: магнитная цепь, воздушный зазор, преобразователь, механическая энергия, тепловая энергия, роликовый элемент, магнитопровод, ферромагнитный вкладыш, магнитный поток.

Введение. К классу устройств альтернативной энергетики могут быть отнесены и устройства прямого преобразования механической энергии в тепловую. Известны устройства такого преобразования^{1, 2, 3} [1], среди которых существует ряд устройств с индукционным нагревом при изменении магнитных потоков⁴. В работе [2] описано устройство прямого преобразования механической энергии в тепловую, в котором повышение эффективности преобразования достигается за счет исключения воздушных зазоров в магнитных цепях. Магнитные потоки коммутируются (прерываются и замыкаются) через подвижные роликовые элементы (прерыватели) магнитных цепей. Воздушные зазоры в магнитных цепях исключены, однако вопрос интенсивности прохождения магнитного потока через перекатывающиеся ролики, а также влияние контактного сопротивления на интенсивность прохождения магнитного потока в данной конструкции не освещены.

Так как в [2] магнитные потоки замыкаются через катящиеся ролики, которые становятся составной частью магнитной цепи, то возникает необходимость количественно оценить степень влияния подвижных элементов (роликов) магнитной цепи на прохождение магнитных потоков. Очевидно, что в данной конструкции будет наблюдаться некоторое ослабление магнитного потока при прохождении через роликовый элемент магнитной цепи и, следовательно, возникает необходимость количественной оценки степени этого ослабления.

Цель работы – экспериментальным способом количественно оценить степень ослабления магнитного потока при его прохождении через роликовые элементы разных типов магнитных цепей и впоследствии применить указанный способ исключения воздушных зазоров в конструкции индукционного устройства прямого преобразования механической энергии в тепловую с учетом указанного ослабления.

Методы исследований. Для проведения экспериментальных исследований влияния роликового элемента неразветвленной магнитной цепи на прохождение магнитного потока удобно использовать трансформатор на стержневом разборном сердечнике типа ПЛ (рисунок 1), например ТС-180.

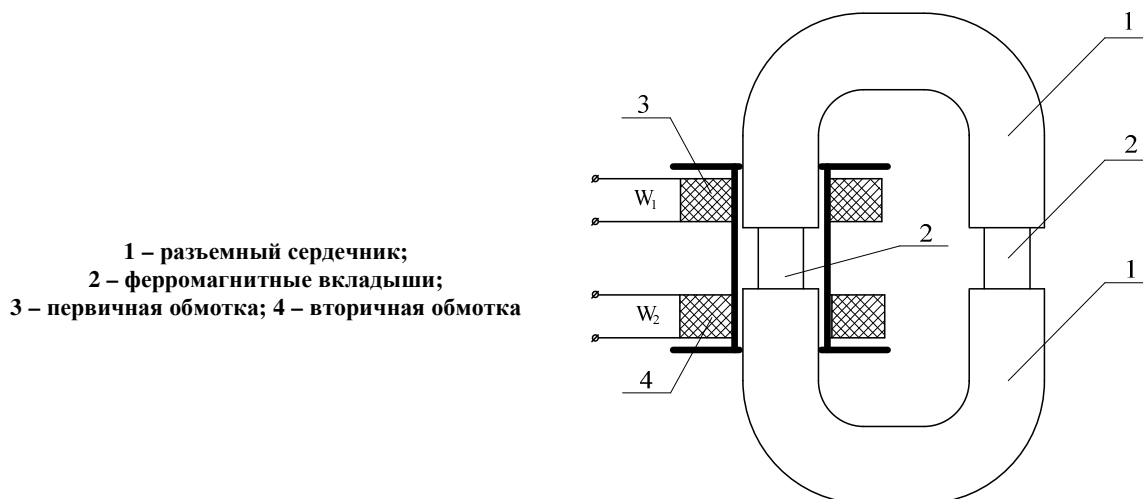
Ферромагнитные вкладыши 2 выполнены в форме прямоугольного параллелепипеда, имеют одинаковое сечение и расположены в неподвижном магнитопроводе 1. Магнитные потоки в таком трансформаторе (см. рисунок 1) будем считать опорными. Тогда, заменив один из ферромагнитных вкладышей 2 на роликовый элемент, при условии, что площади основания вкладыша и роликового элемента будут одинаковыми и длина вкладыша равна длине роликового элемента, будем сравнивать магнитные потоки в указанных магнитных цепях при равных значениях магнитодвижущей силы (МДС).

¹ Опозитный ветрогенератор: пат. РФ 2612237 / А. Ф. Серов, В. Н. Мамонов, В. И. Терехов, А. Д. Назаров. – Оpubл. 03.03.2017.

² Устройство для преобразования механической энергии в тепловую: пат. 2097946 / А. И. Елшин, В. М. Казанский, Е. Д. Карманов, В. И. Михеев. – Оpubл. 27.11.1997.

³ Induction heating device and power generation system provided with same: pat. JP WO2012169398 / Т. Okazaki, Т. Matsuo, Т. Mifune. – Publ. date 13.12.2012.

⁴ См. сноски 2; 3.



1 – разъемный сердечник;
2 – ферромагнитные вкладыши;
3 – первичная обмотка; 4 – вторичная обмотка

Рисунок 1. – О-образный трансформатор с разъемным сердечником

Схемы конструкций элементов магнитных цепей с перекатываемыми роликами, которые были исследованы в данной работе, приведены на рисунках 2–4. В качестве роликов использовались как полностью ферромагнитные цилиндры, так и шарикоподшипники таких же размеров.

Для каждого из приведенных видов элементов магнитных цепей с перекатываемыми роликами требуется получить функциональную зависимость магнитного потока от МДС ($\Phi_i = f(F)$) и сравнить ее с опорной функцией $\Phi_0 = f(F)$ для магнитной цепи с двумя ферромагнитными вставками. Это позволит определить, какой из исследуемых элементов магнитной цепи в меньшей степени ослабляет магнитный поток.

Рисунок 2. – Схема элемента магнитной цепи с двумя перекатываемыми роликами или подшипниками и П-образным основанием

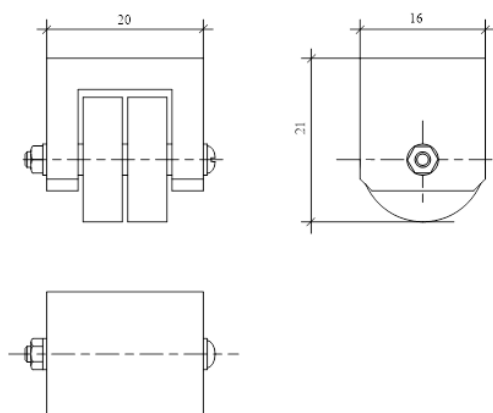
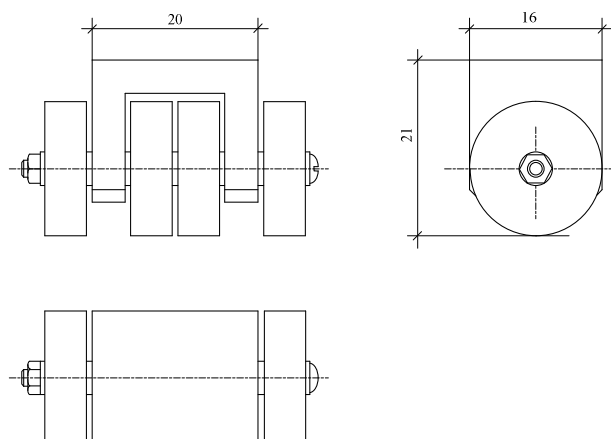


Рисунок 3. – Схема элемента магнитной цепи с четырьмя перекатываемыми роликами или подшипниками и П-образным основанием



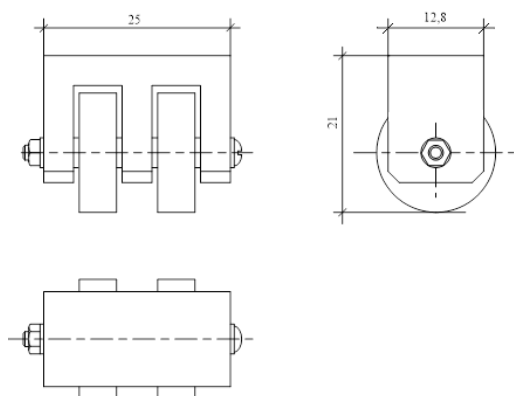


Рисунок 4. – Схема элемента магнитной цепи с двумя перекатывающимися роликами или подшипниками и Ш-образным основанием

Для экспериментального исследования влияния роликового элемента неразветвленной магнитной цепи на прохождение магнитного потока следует собрать электрическую схему, приведенную на рисунке 5.

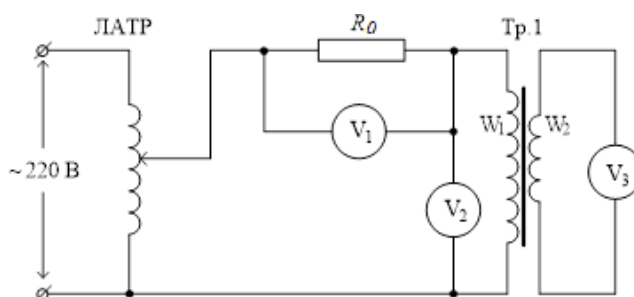


Рисунок 5. – Схема включения трансформатора Тр.1 (ТС-180) для исследования магнитных цепей

При этом будем использовать обмотки, расположенные только на одной катушке трансформатора ТС-180, то есть половину обмоток. Тогда обмотка $W_1 = 375$ витков, а $W_2 = 76$ витков⁵. Трансформатор работает в режиме холостого хода.

Измерение тока в первичной обмотке трансформатора Тр.1 (см. рисунок 5) выполняется вольтметром V_1 по падению напряжения на образцовом сопротивлении $R_0 = 100$ Ом или $R_0 = 10$ Ом в зависимости от значения тока. Тогда величина тока I_1 , А, может быть определена в виде

$$I_1 = U_1 / R_0, \quad (1)$$

где U_1 – показания вольтметра V_1 .

Величина МДС F , А, приложенной к магнитной цепи

$$F = I_1 \cdot W_1. \quad (2)$$

Вольтметром V_3 измеряется действующее значение ЭДС E_2 вторичной обмотки трансформатора Тр.1. Изменяя с помощью ЛАТРа напряжение на первичной обмотке Тр.1 (контроль по вольтметру V_2), измеряем величину E_2 с последующим вычислением действующего значения магнитного потока Φ [4]:

$$\Phi = \frac{E_2}{\omega \cdot W_2}, \quad (3)$$

где E_2 – действующее значение ЭДС, измеренное во вторичной обмотке T_1 ;

W_2 – число витков вторичной обмотки;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – круговая частота.

⁵ Трансформаторы бытовой радиоэлектронной аппаратуры: справочник. – М.: Радио и связь, 1994. – 320 с. – (Массовая радиобиблиотека; вып. 1186).

Величину МДС определяем как произведение тока I_1 в первичной обмотке Тр.1 на число витков W_1 . В результате получаем зависимость $\Phi = f(F)$, то есть зависимость магнитного потока Φ от величины МДС F для исследуемой магнитной цепи.

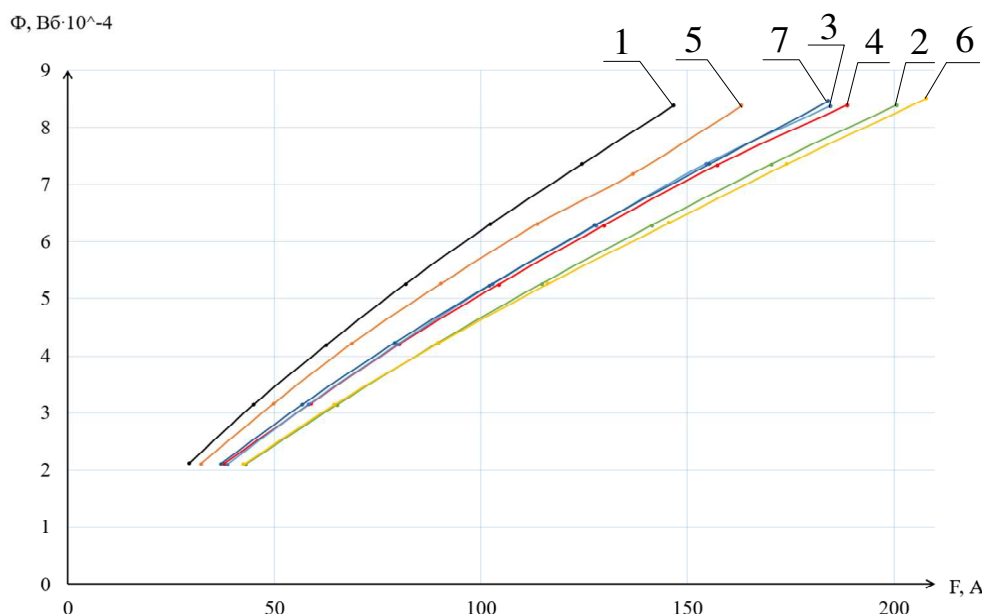
Перед проведением исследований определим верхнюю границу диапазона изменения магнитного потока. Для этого в трансформаторе Тр.1 (см. рисунок 1) удалим ферромагнитные вкладыши 2 из магнитной цепи и подключим его в схему (см. рисунок 2). С помощью ЛАТРа выставим напряжение на первичной обмотке Тр.1 $U_2 = 110$ В (по вольтметру V_2) и измерим ЭДС E_2 вольтметром V_3 . Получим $E_2 = 22,5$ В. Тогда согласно (1) верхнее значение магнитного потока Φ_{max} , Вб, составит

$$\Phi_{max} = \frac{E_2}{\omega \cdot W_2} = \frac{22,5}{314 \cdot 76} = 9,43 \cdot 10^{-4}.$$

Далее собираем магнитопровод трансформатора согласно рисунку 1 вместе с вкладышами и снимаем опорную характеристику магнитной цепи $\Phi_0 = f(F)$ без роликового элемента. Поскольку величина ЭДС E_2 пропорциональна величине магнитного потока $E_2 = \omega \cdot W_2 \cdot \Phi$, то, разбив весь диапазон изменения E_2 (0 – 22,5 В) на примерно равные части, получим ряд точек изменения магнитного потока, вычисляемого по формуле (3). Изменяя вольтметром V_1 в каждой точке характеристики падение напряжения на R_0 , вычисляем ток I_1 по формуле (1) и далее МДС по формуле (2). В результате получим опорную характеристику $\Phi_0 = f(F)$.

Затем заменяем один из вкладышей 2 в доступном стержне магнитопровода 1 (см. рисунок 1) на исследуемый роликовый элемент и повторяем измерения с построением характеристики $\Phi_i = f(F)$.

В результате выполненных измерений по вышеописанной методике было получено семейство функциональных зависимостей $\Phi_i = f(F)$ (рисунок 6).



- 1 – с ферромагнитными вставками (опорная); 2 – содержит роликовый элемент с двумя подшипниками и П-образным основанием; 3 – содержит роликовый элемент с четырьмя подшипниками и П-образным основанием; 4 – содержит роликовый элемент с двумя полнотельными роликами и П-образным основанием; 5 – содержит роликовый элемент с четырьмя полнотельными роликами и П-образным основанием; 6 – содержит роликовый элемент с двумя подшипниками и Ш-образным основанием; 7 – содержит роликовый элемент с двумя полнотельными роликами и Ш-образным основанием

Рисунок 6. – Графики зависимостей $\Phi_i = f(F)$ для магнитных цепей

Как видно из рисунка 6, графики 2–7 зависимости $\Phi_i = f(F)$ для всех исследованных вариантов построения элементов магнитных цепей с роликами (подшипниками) лежат ниже кривой 1, которая соответствует зависимости $\Phi_0 = f(F)$ для опорной магнитной цепи. Это значит, что магнитный поток ослабляется,

проходя через роликовый элемент. Однако, как видно из рисунка 6, разброс функций $\Phi_i = f(F)$ относительно функции $\Phi_0 = f(F)$ сравнительно невелик и при использовании любого варианта конструкции роликового элемента магнитной цепи магнитный поток снижается значительно меньше по сравнению с наличием воздушного зазора [2].

Количественно оценить снижение магнитного потока в магнитной цепи с роликовыми элементами относительно опорной магнитной цепи в относительных единицах при постоянной МДС $F = \text{constant}$ можно по формуле

$$\delta_{\Phi} = \frac{\Phi_0 - \Phi_i}{\Phi_0} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Из сравнения между собой зависимостей 2 (с двумя подшипниками) и 4 (с двумя полнотельными роликами) видно, что полнотельные ролики примерно на 10% меньше ослабляют магнитный поток. Аналогичный вывод можно сделать при сравнении зависимостей 3 (с четырьмя подшипниками) и 5 (с четырьмя полнотельными роликами).

Увеличение количества роликов (подшипников) в точке контакта магнитной цепи также приводит к уменьшению снижения магнитного потока, что естественно и очевидно. Это видно из сравнения зависимостей 2 и 3, а также 4 и 5.

Кривые 2 и 6 с двумя подшипниками и, соответственно, с П-образным и Ш-образным основаниями практически совпадают, предполагая наличие погрешностей изготовления и измерений. Аналогично кривые 4 и 7 с двумя полнотельными роликами и тоже с П-образным и Ш-образным основаниями также совпадают. Отсюда можно сделать вывод, что конструкция основания роликового элемента практически не влияет на ослабление магнитного потока, а основное влияние оказывают конструктивные размеры роликов.

Примерная схема построения такого устройства прямого преобразования механической энергии в тепловую с жидким теплоносителем приведена на рисунке 7.

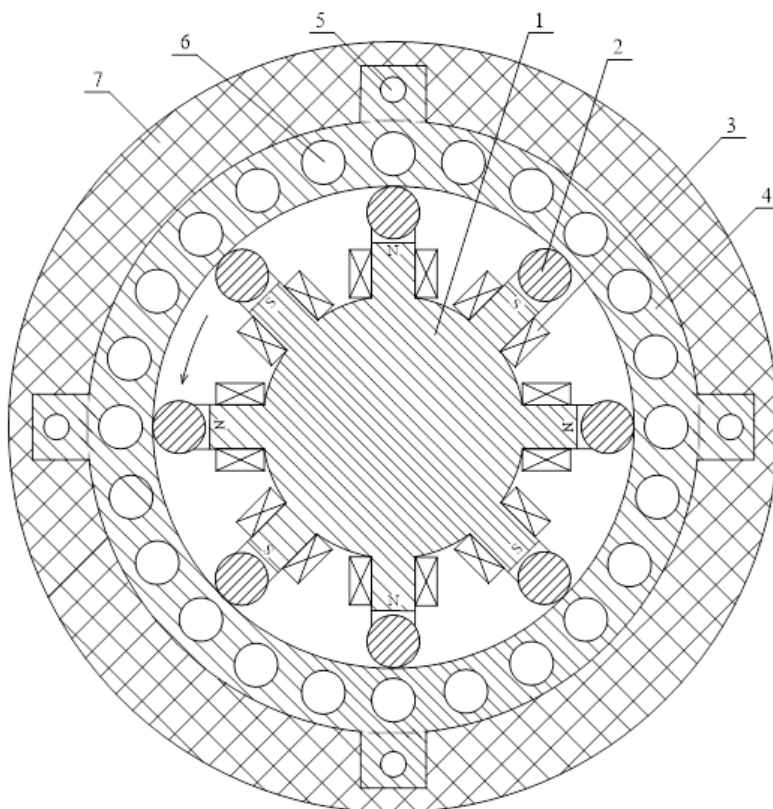
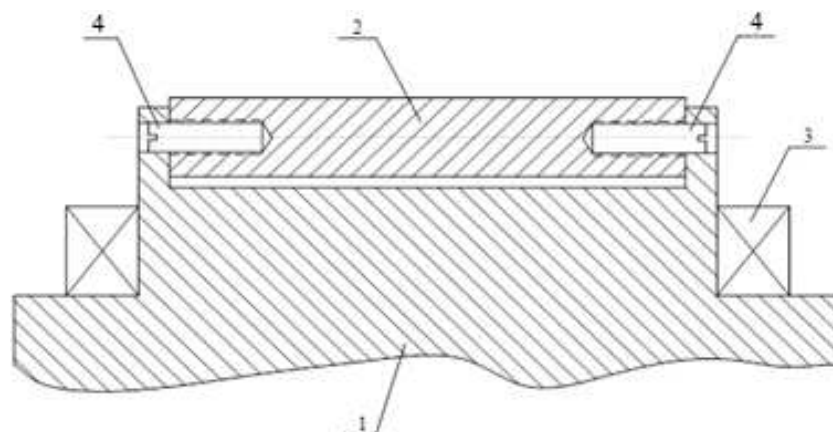


Рисунок 7. – Схема устройства прямого преобразования механической энергии в тепловую с жидким теплоносителем

В состав устройства входит ротор 1 с явно выраженными полюсами, на которых крепятся перекачивающиеся ролики 2, проводящие магнитные потоки. На полюса ротора 1 надеты катушки с током 3, создающие в соседних полюсах МДС в противоположных направлениях поочередно по контуру статора 4,

выполненного из ферромагнитного материала с повышенным удельным электрическим сопротивлением. Ролики 2 перекатываются по внутренней цилиндрической поверхности статора 4, в толще которого высверлены продольные каналы 6 для циркуляции теплоносителя. В дополнительных внешних продольных ребрах статора 4 предусмотрены крепежные отверстия 5 для стяжных шпилек. Для снижения потерь тепла весь преобразовательный узел закрыт слоем теплоизоляции 7.

Условно возможный вариант подвески перекатывающихся роликов 2 на полюсах ротора 1 представлен на рисунке 8.



1 – ротор; 2 – ролик; 3 – обмотка с током; 4 – полюсь вращения

Рисунок 8. – Подвеска роликовых элементов на роторе

На рисунке 8 показан продольный разрез полюса ротора 1 с перекатывающимся роликом 2. В полюсе сделан поперечный вырез, в боковых стенках которого на полюсах 8 установлен ролик 2, а на сам полюс одета катушка с током 3. Все катушки 3 соединены последовательно таким образом, чтобы направления МДС в соседних полюсах были противоположны. Ток возбуждения в катушки 3 подается от внешнего источника через контактные кольца на валу ротора и щетки.

Устройство работает следующим образом. При подаче тока возбуждения в катушки 3 и при вращении ротора 1 магнитные потоки замыкаются в поперечном сечении через соседние полюсы ротора 1, через сам ротор, через перекатывающиеся ролики 2 и статор 4. В результате того, что магнитные потоки в соседних полюсах ротора 1 противоположны, распределение магнитных потоков в поперечном сечении статора 4 имеет участки с разными направлениями магнитных потоков (рисунок 9).

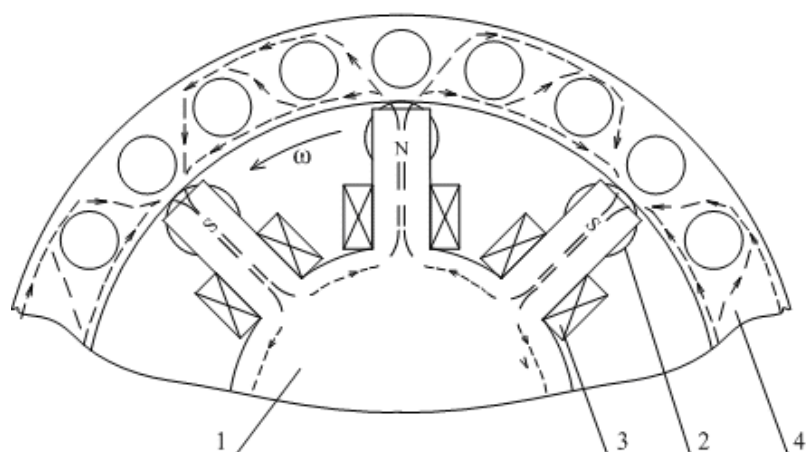


Рисунок 9. – Прохождение магнитных потоков в поперечном сечении преобразователя

Из рисунка 9 видно, что через соседние участки статора 4 между полюсами ротора 1 в поперечном сечении проходят магнитные потоки противоположных направлений. При вращении ротора 1 эти участки тоже смещаются. Следовательно, через каждую неподвижную точку статора 4 проходит переменный магнитный поток, который меняет направление несколько раз за один оборот ротора 1.

Возникающие вихревые токи в статоре 4 разогревают его, и проходящий теплоноситель в продольных каналах статора нагревается.

Поскольку в магнитных цепях этого преобразователя механической энергии в тепловую исключены воздушные зазоры, то эффективность такого преобразователя должна быть выше, чем у преобразователя⁶ при меньших затратах на возбуждение МДС.

Закключение.

1. В результате проведенного экспериментального исследования прохождения магнитных потоков через перекачиваемые ролики ряда различных конструкций получены функциональные зависимости $\Phi_i = f(F)$ (см. рисунок 6) магнитных потоков Φ_i от намагничивающей силы F в неразветвленной магнитной цепи. Полученные зависимости позволяют количественно оценить степень ослабления магнитного потока при его прохождении через роликовые элементы различных типов.

2. Разработана примерная схема построения одного из вариантов устройства для прямого преобразования механической энергии в тепловую с исключением воздушных зазоров в магнитных цепях устройства за счет перекачиваемых роликов. Это позволяет ожидать более высокой эффективности работы устройства прямого преобразования механической энергии в тепловую при меньших затратах на возбуждение МДС в магнитных цепях устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мамонов В. Н., Миськив Н. Б., Назаров А. Д. и др. Генерация тепла в мультицилиндровой системе Куэтта – Тэйлора // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26, № 5. – С. 729–739.
2. Вершинин А. С., Грозберг Ю. Г. Повышение эффективности прямого преобразования механической энергии в тепловую // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2022. – № 4. – С. 56–61. – DOI: [10.52928/2070-1624-2022-38-4-56-61](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-38-4-56-61).
3. Свириденко Э. А., Китунович Ф. Г. Основы электротехники и электроснабжения. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 435 с.

REFERENCES

1. Mamonov, V. N., Mis'kiv, N. B., Nazarov, A. D., Serov, A. F., & Terekhov V. I. (2019) Generatsiya tepla v mul'titsilindrovoy sisteme Kuetta – Teilora [Heat Generation in a Multi-Cylinder Couette – Taylor System]. *Teplofizika i aeromekhanika [Thermophysics and Aeromechanics]*, 26(5), 729–739. (In Russ.).
2. Vershinin, A. S., & Grozberg, Ju. G. (2022). Povyshenie jeffektivnosti prjamogo preobrazovaniya mehanicheskoy jenerгии v teplovuju [Improving Direct Conversion Efficiency Mechanical Energy into Heat]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 56–61. DOI: [10.52928/2070-1624-2022-38-4-56-61](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2022-38-4-56-61). (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Sviridenko, Je. A., & Kitunovich, F. G. (2008). *Osnovy jelektrotehniki i jelektrosnabzhenija*. Minsk: Tehnoperspektiva. (In Russ.).

Поступила 05.10.2023

STUDY OF THE PASSAGE OF MAGNETIC FLUXES THROUGH ROLLING ROLLERS AS PART OF MAGNETIC CIRCUITS

M. VYSOTSKI, A. VERSHININ, Y. GROZBERG
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

Among the wide variety of different converting devices, there are also devices for the direct conversion of mechanical energy into thermal energy. They are of various types, including the induction type. One way to improve the conversion efficiency in such devices is to eliminate air gaps in switched magnetic circuits to increase the intensity of magnetic fluxes. The degree of weakening of the magnetic flux during its passage through the rolling rollers as part of the magnetic circuit has not yet been evaluated. Therefore, in this paper, an attempt is made to quantify the degree of weakening of the magnetic flux in different modes of operation of an unbranched magnetic circuit containing a rolling roller element. The obtained dependencies will make it possible to judge the level of increase in the efficiency of induction devices for the direct conversion of mechanical energy into thermal energy with the indicated option of excluding air gaps in the magnetic circuits of the device.

Keywords: magnetic circuit, air gap, converter, mechanical energy, thermal energy, roller element, magnetic drive, ferromagnetic insert, magnetic flux.

⁶ Induction heating device and power generation system provided with same: pat. JP WO2012169398 / T. Okazaki, T. Matsuo, T. Mifune. – Publ. date 13.12.2012.