

УДК 621.548

DOI 10.52928/2070-1624-2022-38-4-56-61

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ

канд. техн. наук, доц. А. С. ВЕРШИНИН, канд. техн. наук, доц. Ю. Г. ГРОЗБЕРГ
(Полоцкий государственный университет)

В связи с улучшением технических характеристик выпускаемых постоянных магнитов их стали часто применять при генерации электроэнергии, а также для преобразования механической энергии в тепловую. В данной работе рассматриваются устройства прямого преобразования механической энергии в тепловую индукционного типа с постоянными магнитами, анализируются причины низкой эффективности преобразования и проводится поиск способов повышения эффективности работы указанных устройств. Одной из причин является наличие воздушных зазоров в магнитных цепях таких преобразователей. Выполнено исследование влияния величин воздушных зазоров на изменение магнитных потоков в неразветвленной магнитной цепи с постоянной магнитодвижущей силой (МДС) и получена примерная зависимость $\Phi = f(\delta)$, позволяющая количественно оценить степень указанного влияния. Разработана схема конструкции устройства прямого преобразования механической энергии в тепловую индукционного типа с воздушным теплообменом, в которой с целью повышения эффективности преобразования исключены воздушные зазоры в магнитных цепях.

Ключевые слова: магнитная цепь, воздушный зазор, преобразователь, механическая энергия, тепловая энергия, приводной двигатель, вихревой ток, короткозамкнутый виток.

Введение. В технических журналах и среди патентов иногда встречаются публикации с описаниями устройств для прямого преобразования механической энергии в тепловую. Известные способы прямого преобразования механической энергии в тепловую по принципу получения тепла можно разделить на следующие направления:

- получение тепла посредством перемещения конструктивных элементов в вязкой жидкости¹ [1; 2];
- получение тепла за счет преодоления сил трения²;
- получение тепла при образовании вихрей и явлении кавитации в жидкой среде³;
- получение тепла за счет индукционного нагрева вихревыми токами при изменении магнитных потоков⁴.

Каждый из перечисленных способов получения тепла обладает своими достоинствами и недостатками.

Если в качестве приводного двигателя как источника механической энергии рассматривать ветроколесо, то из всего многообразия перечисленных способов преобразования наиболее удобен способ с индукционным нагревом. В силу того, что обороты ветроколеса обычно невелики, эффективность преобразования первых трех из вышеуказанных способов оказывается невысокой.

Эффективность способа преобразования с индукционным нагревом может быть повышена за счет увеличения полюсности преобразователя, что в итоге позволит увеличить частоту изменения магнитных потоков в магнитных цепях. Магнитные потоки в таких преобразователях создаются постоянными магнитами, что делает преобразователи полностью автономными.

Цель работы. Основной целью данной работы является анализ причин низкой эффективности преобразователей прямого преобразования механической энергии в тепловую индукционного типа (с постоянными магнитами), поиск способов повышения эффективности таких преобразователей и разработка схемы конструкции преобразователя с большей эффективностью преобразования.

Возможные пути достижения цели. Как уже было отмечено выше, при низких оборотах приводного двигателя из всех рассмотренных вариантов построения устройств для прямого преобразования механической энергии в тепловую в плане повышения эффективности подходит преобразователь индукционного типа с постоянными магнитами.

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

² Фрикционный нагреватель : пат. РФ 2244223 С1 / В. Л. Гой. – Оpubл. 10.01.2005; Ветровой фрикционный теплогенератор : а. с. СССР № 1627790 / И. Б. Бирюлин, А. А. Ветрова, Д. Д. Васильева, А. А. Шабалин. – Оpubл. 14.08.1991.

³ Вихревой ветротеплогенератор : пат. РФ 2656515 / Н. А. Седых. – Оpubл. 05.06.2018.

⁴ Устройство для преобразования механической энергии в тепловую : пат. РФ 2097946 / А. И. Елшин, В. М. Казанский, Е. Д. Карманов, В. И. Михеев. – Оpubл. 27.11.1997.

Недостаточная эффективность работы такого преобразователя объясняется низкими оборотами приводного двигателя, а также наличием воздушных зазоров, через которые замыкаются пульсирующие магнитные потоки.

Нагрев происходит за счет вихревых токов в ферромагнитных сердечниках и токов в короткозамкнутых витках из металла с повышенным удельным электрическим сопротивлением из-за пульсаций магнитных потоков.

При постоянной МДС постоянного магнита и при наличии воздушных зазоров магнитные потоки значительно ослабляются, величины вихревых токов и токи в короткозамкнутых витках тоже становятся меньше. Следовательно, эффективность такого преобразователя механической энергии в тепловую невелика.

Возможными способами повышения эффективности работы таких преобразователей являются повышение частоты пульсаций магнитных потоков и увеличение интенсивности самих потоков. Для повышения частоты пульсаций магнитных потоков следует увеличивать число полюсов преобразователя, а для увеличения интенсивности магнитных потоков желательно уменьшить (или даже исключить) воздушные зазоры в магнитных цепях указанных преобразователей.

Для количественной оценки повышения эффективности преобразователя механической энергии в тепловую необходимо оценить степень увеличения магнитного потока в магнитной цепи при уменьшении или даже исключении воздушных зазоров.

Чтобы количественно оценить влияние воздушного зазора в магнитной цепи на изменение магнитного потока, следует рассмотреть неразветвленную магнитную цепь с постоянной по величине МДС и двумя воздушными зазорами (так как в преобразователе⁵ магнитные цепи имеют по два воздушных зазора).

Получить количественную оценку указанной зависимости можно экспериментально, исследовав неразветвленную магнитную цепь трансформатора ТС-180 с разъемным магнитопроводом, включенного в схему (рисунок 1).

Из технических данных на трансформатор ТС-180 известны витки первичной обмотки W_1 ($W_1 = 750$) и одной из вторичных обмоток W_2 ($W_2 = 152$)⁶. Сердечник трансформатора – разъемный, поэтому имеется возможность изменять величину воздушных зазоров. Трансформатор работает в режиме холостого хода.

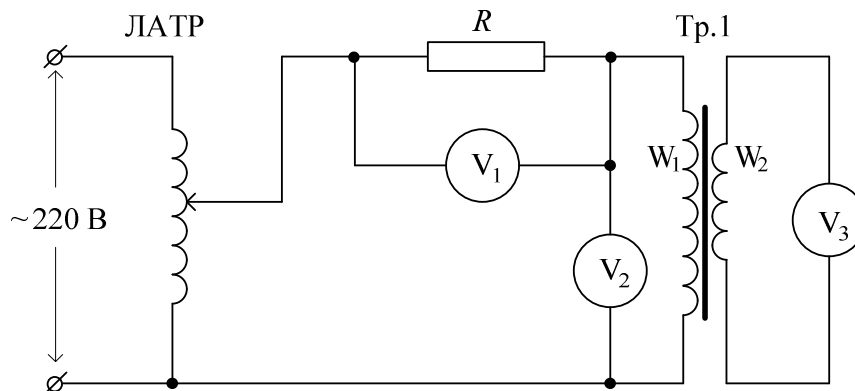


Рисунок 1. – Схема включения трансформатора ТС-180 для исследования влияния воздушного зазора на магнитный поток

В этом режиме ЭДС, трансформируемая во вторичной обмотке [3]

$$e_2 = -\frac{W_2 \cdot d\Phi}{dt} = -W_2 \cdot \omega \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t) = \omega \cdot W_2 \cdot \Phi_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_{2m} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

где $\Phi = \Phi_m \cdot \sin(\omega t)$ – переменный магнитный поток;

$E_{2m} = \omega \cdot W_2 \cdot \Phi_m$ – амплитуда ЭДС во вторичной обмотке.

⁵ Устройство для преобразования механической энергии в тепловую : пат. РФ 2097946 / А. И. Елшин, В. М. Казанский, Е. Д. Карманов, В. И. Михеев. – Опубл. 27.11.1997.

⁶ Сидоров, И. Н. Трансформаторы бытовой радиоэлектронной аппаратуры : справочник / И. Н. Сидоров, С. В. Скорняков. – М. : Радио и связь, 1999. – 336 с.

Тогда действующее значение магнитного потока можно найти по формуле⁷

$$\Phi = \frac{E_2}{\omega \cdot W_2}, \quad (1)$$

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

W_2 – число витков вторичной обмотки;

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

В схеме (см. рисунок 1) измерение тока в первичной обмотке выполняется вольтметром V_1 по падению напряжения U_1 на образцовом сопротивлении R ($R = 100$ Ом). Вольтметром V_3 измеряется действующее значение ЭДС E_2 вторичной обмотки трансформатора. С помощью ЛАТРа поддерживается постоянная МДС $F = constant$ при изменении величин воздушных зазоров в магнитопроводе, вызывающих изменение первичного тока трансформатора.

Прежде всего необходимо определить МДС первичной обмотки трансформатора в номинальном режиме. Для этого при зазорах $\delta_1 = \delta_2 = 0$ необходимо измерить ток I_1 в первичной обмотке трансформатора, включенного на номинальное напряжение $U_{ном} = 220$ В в режиме холостого хода. После включения схемы с помощью ЛАТРа по вольтметру V_2 устанавливается номинальное напряжение $U_{ном} = 220$ В.

Тогда ток I_1 , А:

$$I_1 = \frac{U_1}{R} = \frac{U_1}{100}, \quad (2)$$

отсюда МДС $F = constant$, А:

$$F = I_1 \cdot W_1 = \frac{U_1}{100} \cdot W_1. \quad (3)$$

Во всех последующих измерениях для поддержания постоянной МДС достаточно с помощью ЛАТРа выставлять по вольтметру V_1 значение падения напряжения на R , которое получено при определении МДС в магнитной цепи с нулевыми зазорами, равным $U_1 = constant$ (в данном эксперименте $U_1 = 2,86$ В).

Далее, изменяя величину воздушных зазоров δ_1 и δ_2 в диапазоне от 0 до 1 мм с шагом 0,2 мм и поддерживая постоянной величину МДС (см. выше), вольтметром V_3 измеряется ЭДС E_2 вторичной обмотки трансформатора и вычисляется величина магнитного потока Φ по формуле (1). Результаты измерений представлены в таблице.

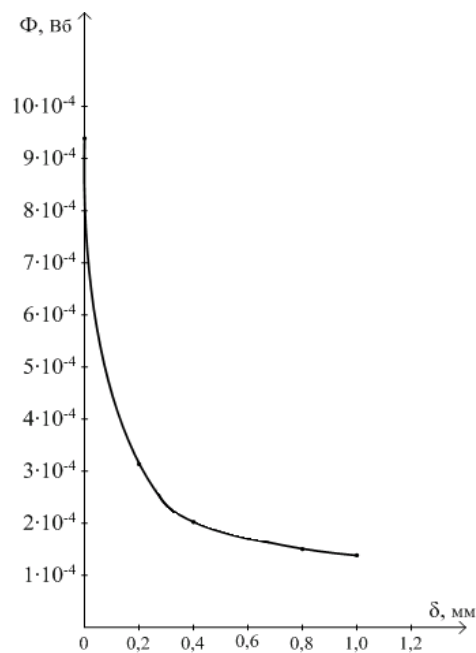
Таблица

Величина зазора		МДС F , А	ЭДС E_2 , В	Магнитный поток Φ , Вб
δ_1 , мм	δ_2 , мм			
0	0	21,45	44,80	$9,386 \cdot 10^{-4}$
0,2	0,2	21,45	14,96	$3,134 \cdot 10^{-4}$
0,4	0,4	21,45	9,74	$2,040 \cdot 10^{-4}$
0,6	0,6	21,45	8,20	$1,718 \cdot 10^{-4}$
0,8	0,8	21,45	7,16	$1,500 \cdot 10^{-4}$
1,0	1,0	21,45	6,62	$1,387 \cdot 10^{-4}$

На рисунке 2 представлен график искомой зависимости $\Phi = f(\delta)$, построенный по результатам выполненных измерений (см. таблицу).

⁷ Сидоров, И. Н. Трансформаторы бытовой радиоэлектронной аппаратуры : справочник / И. Н. Сидоров, С. В. Скорняков. – М. : Радио и связь, 1999. – 336 с.

Рисунок 2. – График зависимости $\Phi = f(\delta)$



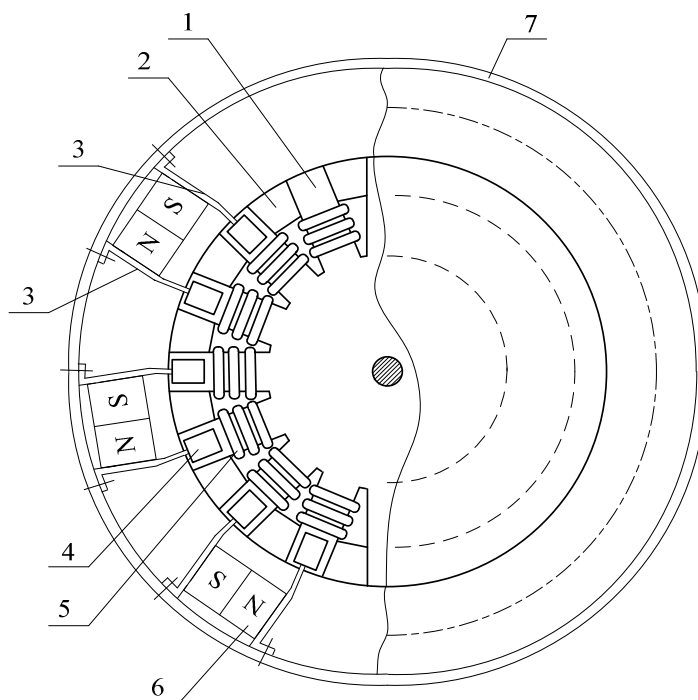
Из графика зависимости $\Phi = f(\delta)$ (см. рисунок 2) и таблицы видно, что при увеличении зазоров до $\delta_1 = \delta_2 = 1$ мм магнитный поток в неразветвленной магнитной цепи при поддержании МДС $F = constant$ уменьшается в 6,8 раза.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что наличие воздушного зазора значительно ослабляет магнитный поток в неразветвленной магнитной цепи с постоянной МДС.

Следовательно, для повышения эффективности работы устройств прямого преобразования механической энергии в тепловую индукционного типа с постоянными магнитами желательно вообще исключить воздушные зазоры. При этом условии можно ожидать увеличения эффективности такого преобразования более, чем в 6 раз.

Схема устройства теплопреобразовательного узла преобразователя механической энергии в тепловую, у которого исключены воздушные зазоры в магнитных цепях, приведена на рисунке 3.

Рисунок 3. – Схема устройства теплопреобразовательного узла



Основу преобразователя составляет теплопреобразовательный узел, в состав которого входит многолопастной ферромагнитный диск 1. По внешнему контуру диска между ферромагнитными лопастями вставлены немагнитные вставки 2, которые вместе с лопастями образуют относительно неширокую кольцевую дорожку. Эта дорожка по внешнему контуру диска 1 проточена и образует дорожку качения.

По периметру диска 1 на неподвижных основаниях закреплены магнитные узлы с постоянными магнитами 6, которые через магнитопроводы 3 и ролики 4 создают магнитные потоки в лопастях ферромагнитного диска 1. На лопасти ферромагнитного диска 1 одеты короткозамкнутые витки 5 из материала с повышенным удельным электрическим сопротивлением.

Принцип действия прямого преобразователя механической энергии в тепловую рассмотрим на примере одного теплопреобразовательного узла.

При вращении ферромагнитного диска 1 ролики магнитных узлов 4 катятся по кольцевой дорожке ферромагнитного диска 1. Когда ролики 4 накатываются на ферромагнитные лопасти диска 1, под действием постоянного магнита 6 скачком увеличивается магнитный поток с одной лопасти на другую, а когда ролики 4 накатываются на немагнитные участки (вставки), магнитный поток прерывается. Когда на лопасть ферромагнитного диска 1 накатывается ролик 4 от соседнего магнитного узла, опять скачком увеличивается магнитный поток с лопасти на лопасть, но в противоположном направлении.

В результате при вращении ферромагнитного диска 1 в лопастях возникают переменные импульсные магнитные потоки.

В материале лопастей возникают вихревые токи, разогревающие лопасти ферромагнитного диска 1 и через них весь диск. Кроме того, в короткозамкнутых витках с повышенным удельным сопротивлением также возникают токи, разогревающие эти витки, что в итоге приводит к дополнительному разогреву ферромагнитного диска 1.

Пакет из таких теплопреобразовательных узлов монтируется на общий вал и помещается в корпус с подводным и отводящим воздуховодами. В результате получается конструкция прямого преобразователя механической энергии в тепловую с воздушным теплообменом.

Учитывая, что в данной конструкции воздушные зазоры в магнитных цепях полностью исключены, то магнитные потоки, которые замыкаются через лопасти ферромагнитного диска 1, увеличатся примерно в 6 раз, а значит, и эффективность прямого преобразования механической энергии в тепловую с постоянными магнитами значительно увеличится.

Заключение.

1. Проведенные в работе исследования показали, что в магнитных цепях с постоянной МДС наличие воздушного зазора снижает величину магнитного потока практически на порядок (см. рисунок 2).

2. При построении прямых преобразователей механической энергии в тепловую с низкой скоростью вращения вала приводного двигателя, например ветродвигателя, целесообразно использовать преобразователи индукционного типа с постоянными магнитами, поскольку за счет увеличения количества лопастей ферромагнитных дисков можно увеличить частоту пульсаций магнитного потока в магнитных цепях при низких оборотах.

3. Существенное увеличение эффективности (до 10 раз) преобразования механической энергии в тепловую в таких преобразователях может быть достигнуто за счет исключения воздушных зазоров в магнитных цепях устройства.

4. Предложена конструкция устройства для прямого преобразования механической энергии в тепловую, в которой исключены воздушные зазоры в магнитных цепях.

На основании вышеизложенного следует ожидать значительного увеличения эффективности таких преобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Генерация тепла в мультицилиндровой системе Куэтта – Тэйлора / В. Н. Мамонов [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2019. – Т. 26, № 5. – С. 729–739.
2. Nouri-Borujerdi, A. Heat transfer enhancement in annular flow with outer grooved cylinder and rotating inner cylinder: Review and experiments / A. Nouri-Borujerdi, M. E. Nakhchi // Applied Thermal Engineering. – 2017. – № 120. – P. 257–268.
3. Электротехника и электроника. Электрические и магнитные цепи : учеб. пособие / Р. В. Ахмадеев [и др.] ; под ред. Т. М. Крымской. – Уфа : Уфим. гос. авиац. техн. ун-т, 2009. – 147 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. Nouri-Borujerdi, A., & Nakhchi M. E. (2017) Heat transfer enhancement in annular flow with outer grooved cylinder and rotating inner cylinder: Review and experiments. *Applied Thermal Engineering*, (120), 257–268.
3. Akhmadeev, R. V., Vavilova, I. V., Grakhov, P. A., & Krymskaya, T. M. (2009) *Elektrotehnika i elektronika. Elektricheskie i magnitnye tsepi [Electrical and Electronics. Electrical and magnetic circuits]*. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet. (In Russ.).

Поступила 30.11.2021

IMPROVING DIRECT CONVERSION EFFICIENCY MECHANICAL ENERGY INTO HEAT

A. VERSHININ, Y. GROZBERG

In connection with the improvement of the technical characteristics of the produced permanent magnets, they began to be often used in generating electricity and also for converting mechanical energy into thermal energy. In this paper, devices for direct conversion of mechanical energy into thermal energy of the induction type with permanent magnets are considered, the reasons for the low conversion efficiency are analyzed, and a search is made for ways to increase the efficiency of these devices. One of the reasons is the presence of air gaps in the magnetic circuits of such converters. The study of the influence of the values of air gaps on the change in magnetic fluxes in an unbranched magnetic circuit with a constant MDF has been carried out, and an approximate dependence $\Phi = f(\delta)$ has been obtained, which makes it possible to quantitatively assess the degree of this influence. A design diagram of a device for direct conversion of mechanical energy into thermal energy of induction type with air heat exchange has been developed, in which air gaps in magnetic circuits are excluded in order to increase the conversion efficiency.

Keywords: magnetic circuit, air gap, converter, mechanical energy, thermal energy, drive motor, eddy current, short-circuited loop.