

УДК 621.548

DOI 10.52928/2070-1624-2023-41-2-48-55

ВЫБОР ТИПА МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ В ИНДУКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ**М. Э. ВЫСОЦКИЙ, канд. техн. наук, доц. А. С. ВЕРШИННИН,****канд. техн. наук, доц. Ю. Г. ГРОЗБЕРГ****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

По мере улучшения технических характеристик выпускаемых промышленностью постоянных магнитов их стали чаще применять при генерации электроэнергии, а также в индукционных устройствах прямого преобразования механической энергии в тепловую. Для повышения эффективности последних следует увеличивать либо частоту прерываний магнитных потоков, либо их интенсивность. В данной работе проведен сравнительный анализ неразветвленных магнитных цепей с источниками магнитодвижущей силы в виде постоянного магнита и в виде катушки с током (электромагнита) с целью количественной оценки влияния воздушных зазоров на изменение магнитных потоков в этих цепях. Результаты выполненного анализа позволят оптимизировать выбор типа магнитных цепей в индукционных устройствах прямого преобразования механической энергии в тепловую.

Ключевые слова: магнитная цепь, воздушный зазор, преобразователь, механическая энергия, тепловая энергия, магнитное сопротивление, магнитная проницаемость, магнитодвижущая сила, магнитный поток.

Введение. В технических журналах и среди патентов встречаются публикации с описаниями устройств для прямого преобразования механической энергии в тепловую, в том числе и индукционного типа^{1,2} [1; 2], в которых получение тепла происходит за счет нагрева индукционными токами при изменении магнитных потоков. В указанных устройствах в качестве источников магнитодвижущей силы (МДС) для получения магнитных потоков в магнитных цепях используются как постоянные магниты, так и катушки с током (электромагниты). Только в устройствах³ магнитные цепи содержат воздушные зазоры, а в [3; 4] воздушные зазоры исключены. Конечно, исключение воздушных зазоров в магнитных цепях уменьшает магнитное сопротивление цепи и в какой-то степени увеличивает магнитный поток, но желательно количественно оценить получаемый эффект.

В любом случае при построении индукционного устройства прямого преобразования механической энергии в тепловую приходится делать выбор типа магнитной цепи: либо с постоянным магнитом в качестве источника МДС, либо с катушкой и током. И те и другие магнитные цепи могут либо содержать, либо не содержать воздушные зазоры. При этом степень влияния исключения воздушных зазоров на магнитное сопротивление цепи и, соответственно, на магнитный поток может оказаться разным. В этом случае также желательно получить количественную оценку указанной степени влияния.

Цель работы. Основной целью данной работы является сравнительный анализ неразветвленных магнитных цепей, в которых МДС создается либо постоянным магнитом, либо катушкой с током, и выбор наиболее эффективного типа магнитных цепей для устройств прямого преобразования механической энергии в тепловую индукционного типа.

Возможные пути достижения цели. Для проведения сравнительного анализа и получения количественных оценок влияния воздушных зазоров в разных магнитных цепях следует рассмотреть две одинаковые по геометрическим размерам неразветвленные магнитные цепи с одинаковыми характеристиками магнитопроводов и одинаковыми по величине воздушными зазорами. Однако в одной цепи следует задать МДС постоянным магнитом, а в другой – катушкой с током (электромагнитом).

В обоих случаях, чтобы не перенасыщать магнитопровод магнитным потоком, за исходное состояние целесообразно принять замкнутую магнитную цепь без воздушных зазоров и с помощью МДС задать одинаковые магнитные потоки в цепи.

При последующем введении воздушных зазоров в рассматриваемые магнитные цепи в каждой из них магнитные потоки уменьшаются. По степени их уменьшения можно количественно оценить влияние воздушных зазоров на прохождение магнитных потоков в двух видах рассматриваемых магнитных цепей.

¹ 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.

² Induction heating device and power generation system provided with same: pat. JP WO2012169398 / Т. Okazaki, Т. Matsuo, Т. Mifune. – Pubл. date 13.12.2012.

³ См. сноски 1; 2.

Для проведения сравнительного анализа указанных магнитных цепей будем использовать приближенный метод расчета неразветвленной магнитной цепи, когда пренебрегают рассеиванием магнитного потока и считают, что он распределен равномерно по сечению участка магнитной цепи [3]. При этом предполагается, что магнитная индукция B и абсолютная магнитная проницаемость $\mu_{абс}$ во всех точках участка магнитной цепи будут неизменны.

Рассмотрим неразветвленную магнитную цепь с постоянным магнитом. Так, на рисунке 1 приведена геометрия типовой неразветвленной магнитной цепи с двумя воздушными зазорами δ_1 и δ_2 , магнитопроводами 1 и 2, в которой МДС задается постоянным магнитом 3.

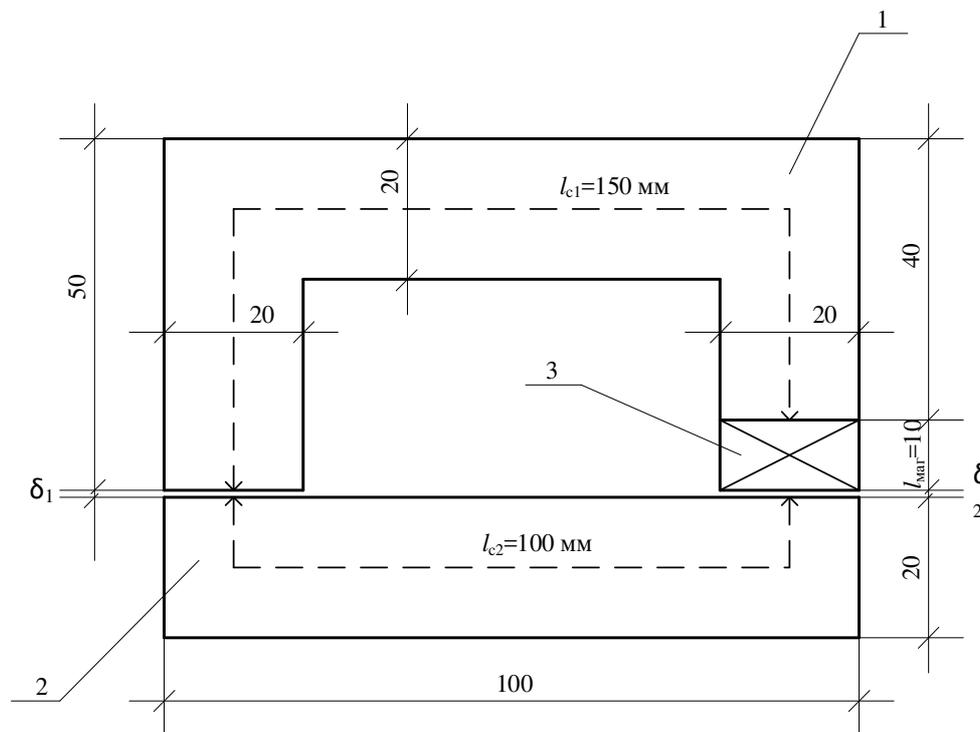
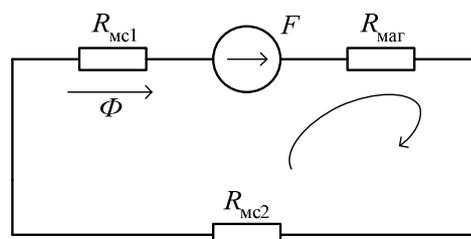


Рисунок 1. – Магнитная цепь с постоянным магнитом и двумя воздушными зазорами

Пусть воздушные зазоры $\delta_1 = \delta_2 = 1$ мм, толщина магнитопровода $b = 50$ мм, остаточная магнитная индукция постоянного магнита $B_m = 1,2$ Тл, длина средней линии магнитопровода 1 $l_{c1} = 150$ мм, магнитопровода 2 $l_{c2} = 100$ мм, относительная магнитная проницаемость постоянного магнита $\mu_m = 1,05$, относительная магнитная проницаемость магнитопровода из электротехнической стали $\mu_{ст} = 4000$.

Предположим, что магнитная цепь замкнута, то есть воздушные зазоры исключены ($\delta_1 = \delta_2 = 0$). В этом случае эквивалентная схема замещения приведенной магнитной цепи принимает вид, показанный на рисунке 2.

Рисунок 2. – Эквивалентная схема замещения магнитной цепи с постоянным магнитом и исключенными воздушными зазорами



В приведенной схеме замещения $F_{маг}$ – магнитодвижущая сила постоянного магнита 3, включенного в магнитную цепь. Остальные элементы в схеме замещения – это магнитные сопротивления: $R_{маг}$ – постоянного магнита 3; R_{mc1} и R_{mc2} – стальных магнитопроводов 1 и 2 соответственно.

МДС постоянного магнита может быть определена в виде [3]

$$F_{\text{маг}} = H_{\text{маг}} \cdot l_{\text{маг}}, \quad (1)$$

где $H_{\text{маг}}$ – напряженность магнитного поля по оси намагничивания постоянного магнита;

$l_{\text{маг}} = 10$ мм – длина постоянного магнита по оси намагничивания (см. рисунок 1).

Напряженность магнитного поля $H_{\text{маг}}$, А/м, вдоль оси намагничивания постоянного магнита может быть определена в виде⁴

$$H_{\text{маг}} = \frac{B_{\text{mr}}}{\mu_{\text{амаг}}} = \frac{B_{\text{mr}}}{\mu_m \cdot \mu_0}, \quad (2)$$

где B_{mr} – остаточная магнитная индукция постоянного магнита, Тл;

$\mu_{\text{амаг}}$ – абсолютная магнитная проницаемость постоянного магнита, Гн/м;

μ_m – относительная магнитная проницаемость постоянного магнита ($\mu_m = 1,05$);

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Тогда с учетом (2) МДС постоянного магнита $F_{\text{маг}}$, А, получим в виде

$$F_{\text{маг}} = \frac{B_{\text{mr}} \cdot l_{\text{маг}}}{\mu_m \cdot \mu_0}. \quad (3)$$

Для рассматриваемой магнитной цепи $F_{\text{маг}} = 9094,6$ А.

Магнитное сопротивление участка магнитной цепи R_m , А/Вб, также приближенно вычисляется по формуле [3]

$$R_m = \frac{l}{\mu_m \cdot \mu_0 \cdot S}, \quad (4)$$

где l – длина средней линии участка магнитной цепи, м;

S – поперечное сечение магнитопровода участка магнитной цепи, м²;

μ_m – относительная магнитная проницаемость материала участка магнитной цепи;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Формула (4) применима ко всем участкам магнитной цепи.

Найдем магнитные сопротивления всех элементов в схеме замещения магнитной цепи (см. рисунок 2).

Для стального магнитопровода 1 (см. рисунок 1) $l_{c1} = 150$ мм = 0,15 м; $S_{c1} = (20 \cdot 50)$ мм² = $1 \cdot 10^{-3}$ м²; $\mu_{cm} = 4000$. Тогда магнитное сопротивление R_{mc1} будет равно

$$R_{mc1} = \frac{l_{c1}}{\mu_{cm} \cdot \mu_0 \cdot S_{c1}} = \frac{0,15}{4000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 29,841 \cdot 10^3 \text{ А/Вб}.$$

Стальной магнитопровод 2 (см. рисунок 1) имеет то же сечение $S_{c2} = S_{c1} = (20 \cdot 50)$ мм² = $1 \cdot 10^{-3}$ м² и выполнен из той же электротехнической стали. Однако у него длина средней линии $l_{c1} = 100$ мм = 0,1 м. Тогда магнитное сопротивление R_{mc2} будет равно

$$R_{mc2} = \frac{l_{c2}}{\mu_{cm} \cdot \mu_0 \cdot S_{c2}} = \frac{0,1}{4000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 19,895 \cdot 10^3 \text{ А/Вб}.$$

Постоянный магнит 3 в магнитной цепи (см. рисунок 1) также обладает магнитным сопротивлением $R_{\text{маг}}$, которое приближенно тоже может быть вычислено по выражению (4). Из геометрии магнитной цепи

⁴ Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – Изд. 6-е испр. – М.: Наука, 1974. – 944 с.

(см. рисунок 1) $l_{\text{маг}} = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$, а сечение постоянного магнита равно сечению стали $S_{\text{маг}} = S_{c1} = S_{c2}$. Относительная магнитная проницаемость постоянного магнита $\mu_m = 1,05$. Тогда магнитное сопротивление постоянного магнита $R_{\text{маг}}$ будет равно

$$R_{\text{маг}} = \frac{l_{\text{маг}}}{\mu_m \cdot \mu_0 \cdot S_{\text{маг}}} = \frac{0,01}{1,05 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 7,579 \cdot 10^6 \text{ А/Вб}.$$

Согласно схеме замещения магнитной цепи (см. рисунок 2) суммарное эквивалентное магнитное сопротивление всей цепи равно

$$R_{\text{м}\Sigma 1} = R_{\text{мс}1} + R_{\text{мс}2} + R_{\text{маг}} = 7628,736 \cdot 10^3 \text{ А/Вб}.$$

Тогда величина магнитного потока в этой магнитной цепи составит

$$\Phi_1 = \frac{F_{\text{маг}}}{R_{\text{м}\Sigma 1}} = \frac{9\,094,6}{7628,736 \cdot 10^3} = 1,192 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}. \quad (5)$$

Теперь в ту же магнитную цепь (см. рисунок 1) введем воздушные зазоры $\delta_1 = \delta_2 = 1 \text{ мм}$. Эквивалентная схема замещения магнитной цепи с воздушными зазорами принимает вид, показанный на рисунке 3.

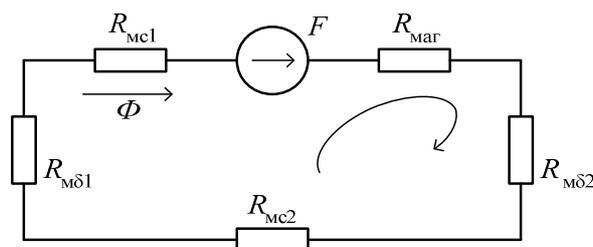


Рисунок 3. – Эквивалентная схема замещения магнитной цепи с постоянным магнитом и с воздушными зазорами $\delta_1 = \delta_2 = 1 \text{ мм}$

Поскольку геометрия и параметры сохранившихся участков магнитной цепи не изменились, то и магнитные сопротивления этих участков цепи и величина МДС постоянного магнита тоже не изменятся.

Магнитные сопротивления воздушных зазоров одинаковы $R_{\text{м}\delta 1} = R_{\text{м}\delta 2}$, так как $\delta_1 = \delta_2$, а сечения воздушных зазоров равны сечению стальных магнитопроводов $S_{\delta 1} = S_{\delta 2} = (20 \cdot 50) \text{ мм}^2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Относительная магнитная проницаемость воздуха $\mu_\delta = 1^5$. Тогда магнитные сопротивления воздушных зазоров $R_{\text{м}\delta 1}$ и $R_{\text{м}\delta 2}$ будут равны

$$R_{\text{м}\delta 1} = R_{\text{м}\delta 2} = R_{\text{м}\delta} = \frac{\delta_1}{\mu_\delta \cdot \mu_0 \cdot S_\delta} = \frac{0,001}{1 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 7,958 \cdot 10^5 \text{ А/Вб}.$$

Тогда в схеме замещения магнитной цепи (см. рисунок 3) суммарное эквивалентное магнитное сопротивление всей цепи будет равно

$$R_{\text{м}\Sigma 2} = 2 \cdot R_{\text{м}\delta} + R_{\text{мс}1} + R_{\text{мс}2} + R_{\text{маг}} = 9220,336 \cdot 10^3 \text{ А/Вб}.$$

Величина магнитного потока в этой магнитной цепи составит

$$\Phi_2 = \frac{F_{\text{маг}}}{R_{\text{м}\Sigma 2}} = \frac{9\,094,6}{9\,220,336 \cdot 10^3} = 0,986 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}. \quad (6)$$

⁵ Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – Изд. 6-е испр. – М.: Наука, 1974. – 944 с.

Из сравнения полученных магнитных потоков в выражениях (5) и (6) видно, что введение воздушных зазоров в магнитную цепь уменьшает магнитный поток, но незначительно. Относительное уменьшение магнитного потока в рассмотренной магнитной цепи составляет

$$\frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1} \cdot 100\% = 17,282\% \quad (7)$$

Причиной такого слабого уменьшения магнитного потока при введении воздушных зазоров в данной магнитной цепи является большое магнитное сопротивление постоянного магнита. Относительная магнитная проницаемость постоянного магнита $\mu_m = 1,05$, в то время как для воздуха относительная магнитная проницаемость $\mu = 1,0$. Таким образом, в плане магнитного сопротивления постоянный магнит ведет себя почти как воздушный зазор, длина которого равна длине магнита вдоль оси намагничивания. Поэтому в магнитных цепях, в которых МДС задается постоянными магнитами, из-за малого эффекта не имеет смысла бороться за исключение воздушных зазоров с целью увеличения магнитного потока.

Далее рассмотрим такую же по геометрическим размерам магнитную цепь с двумя воздушными зазорами и магнитопроводом из того же материала, но исключим из нее постоянный магнит (рисунок 4). МДС в этой цепи задается катушкой с током (электромагнитом).

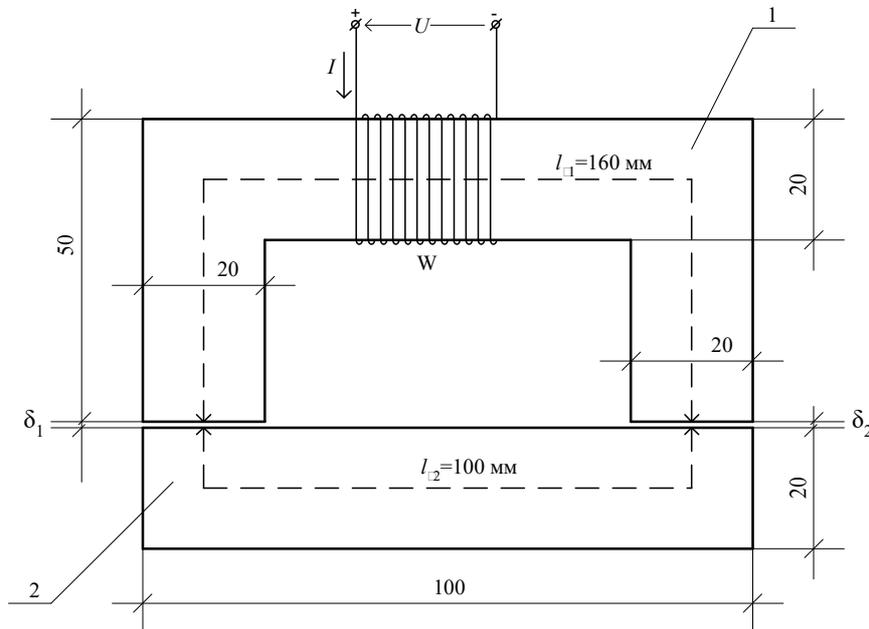


Рисунок 4. – Магнитная цепь с двумя воздушными зазорами и электромагнитом

В магнитной цепи (см. рисунок 4) сохраним величины воздушных зазоров $\delta_1 = \delta_2 = 1$ мм и толщину магнитопровода $b = 50$ мм. Длина средней линии магнитопровода 1 увеличится до $l_{c1} = 160$ мм (вместо постоянного магнита – сталь), длина средней линии магнитопровода 2 сохранится $l_{c2} = 100$ мм, относительная магнитная проницаемость магнитопровода сохранится $\mu_{cm} = 4000$.

Предположим, что магнитная цепь замкнута, то есть воздушные зазоры исключены $\delta_1 = \delta_2 = 0$. В этом случае эквивалентная схема замещения приведенной магнитной цепи (см. рисунок 4) принимает вид, показанный на рисунке 5.

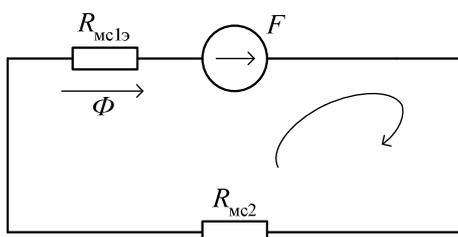


Рисунок 5. – Эквивалентная схема замещения магнитной цепи с электромагнитом и исключенными воздушными зазорами

МДС, создаваемая катушкой с током, определяется в виде [3]

$$F = I \cdot W \quad (8)$$

В магнитной цепи (см. рисунок 4) проходит магнитный поток Φ_3 , равный по величине магнитному потоку Φ_1 , протекающему в магнитной цепи (см. рисунок 1) с постоянным магнитом. Таким образом, $\Phi_3 = \Phi_1 = 1,192 \cdot 10^{-3}$ Вб.

Теперь необходимо определить величину МДС F магнитной цепи (см. рисунок 4) для получения такого магнитного потока. Из схемы замещения этой магнитной цепи (см. рисунок 5) видно, что суммарное эквивалентное магнитное сопротивление магнитной цепи можно получить в виде

$$R_{\Sigma 3} = R_{\Sigma 1} + R_{\Sigma 2}, \quad (9)$$

где $R_{\Sigma 2} = 19,895 \cdot 10^3$ А/Вб – магнитное сопротивление магнитопровода 2, такое же, как в магнитной цепи (см. рисунок 1);

$R_{\Sigma 1}$ – магнитное сопротивление магнитопровода 1 в магнитной цепи (см. рисунок 4). Оно не равно $R_{\Sigma 1}$, так как длина средней линии l_{c1} магнитопровода 1 стала больше на 10 мм – $l_{c1} = 160$ мм:

$$R_{\Sigma 1} = \frac{l_{c1}}{\mu_{cm} \cdot \mu_0 \cdot S_{c1}} = \frac{0,16}{4000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 31,831 \cdot 10^3 \text{ А/Вб}.$$

Тогда согласно (9) получим

$$R_{\Sigma 3} = 19,895 \cdot 10^3 + 31,831 \cdot 10^3 = 51,726 \cdot 10^3 \text{ А/Вб}.$$

Необходимая МДС F в магнитной цепи (см. рисунок 4) для создания магнитного потока $\Phi_3 = \Phi_1 = 1,192 \cdot 10^{-3}$ Вб согласно схеме замещения (см. рисунок 5) может быть найдена по закону Ома для магнитной цепи [3]:

$$F = \Phi_3 \cdot R_{\Sigma 3} = 1,192 \cdot 10^{-3} \cdot 51,726 \cdot 10^3 = 61,65 \text{ А}. \quad (10)$$

При введении воздушных зазоров $\delta_1 = \delta_2 = 1$ мм в магнитную цепь (см. рисунок 4) эквивалентная схема замещения магнитной цепи примет вид, как на рисунке 6).

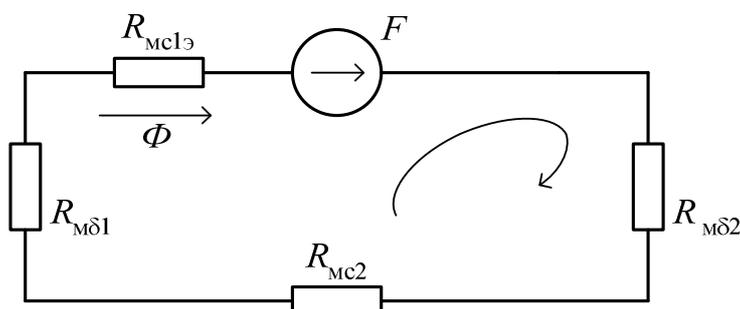


Рисунок 6. – Эквивалентная схема замещения магнитной цепи с электромагнитом и двумя воздушными зазорами $\delta_1 = \delta_2 = 1$ мм

В этой схеме замещения величина МДС F соответствует (10), магнитные сопротивления участков магнитопровода $R_{\Sigma 1}$ и $R_{\Sigma 2}$ не изменятся, добавятся только магнитные сопротивления воздушных зазоров.

$$R_{\Sigma \delta 1} = R_{\Sigma \delta 2} = R_{\Sigma \delta} = \frac{\delta_1}{\mu_{\delta} \cdot \mu_0 \cdot S_{\delta}} = \frac{0,001}{1 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 7,958 \cdot 10^5 \text{ А/Вб}.$$

Суммарное магнитное сопротивление магнитной цепи (см. рисунок 6) будет равно

$$R_{\Sigma 4} = R_{\delta 1} + R_{\delta 2} + R_{\text{мс}1\text{э}} + R_{\text{мс}2} = 7,958 \cdot 10^5 \cdot 2 + 19,895 \cdot 10^3 + 31,831 \cdot 10^3 = 1643,326 \cdot 10^3 \text{ А/Вб}.$$

Тогда величина магнитного потока в этой магнитной цепи уменьшится до значения

$$\Phi_4 = \frac{F}{R_{\Sigma 4}} = \frac{61,65 \text{ А}}{1643,326 \cdot 10^3 \text{ А/Вб}} = 0,0375 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}. \quad (11)$$

Относительное уменьшение магнитного потока при введении воздушных зазоров в магнитную цепь с электромагнитом составляет

$$\frac{\Phi_3 - \Phi_4}{\Phi_3} \cdot 100 \% = \frac{1,192 \cdot 10^{-3} - 0,0375 \cdot 10^{-3}}{1,192 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 \% = 96,854 \%. \quad (12)$$

Из сравнения (7) и (12) видно, что относительное уменьшение магнитного потока при введении воздушных зазоров в магнитную цепь с постоянным магнитом составляет всего 17,282 %, а при введении воздушных зазоров в магнитную цепь с электромагнитом магнитный поток уменьшается на 96,854 %. Из этого следует, что в магнитной цепи с электромагнитом степень влияния воздушных зазоров на изменение магнитного потока значительно выше. Конечно, если в качестве материала магнитопровода применить конструкционную углеродистую сталь, у которой относительная магнитная проницаемость много меньше ($\mu_{cm} = 100$), то и указанная степень влияния тоже резко уменьшится, но все равно будет преобладать. При этом, конечно же, не следует перенасыщать магнитопровод цепи магнитным потоком. Вместе с тем, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в магнитной цепи с электромагнитом (катушкой с током) в качестве источника МДС можно получить необходимую величину магнитного потока при меньшей величине МДС F .

Поскольку в магнитных цепях с электромагнитом в качестве источника МДС воздушные зазоры очень сильно ослабляют магнитные потоки, то в таких цепях имеет смысл их исключить из магнитной цепи. Соответственно, в устройствах прямого преобразования механической энергии в тепловую в качестве источников МДС целесообразно использовать катушку с током (электромагнит) и конструктивно постараться исключить воздушные зазоры в магнитных цепях. Это позволит повысить эффективность устройств прямого преобразования механической энергии в тепловую.

Заключение.

1. В результате проведенного сравнительного анализа неразветвленных магнитных цепей с источниками МДС в виде постоянного магнита и в виде катушки с током (электромагнита) выявлено, что в цепи с постоянным магнитом введение и исключение воздушных зазоров слабее влияет на изменение магнитного потока по сравнению с магнитной цепью, содержащей катушку с током (электромагнит). Это является следствием того, что относительная магнитная проницаемость материала магнита ($\mu_m = 1,05$) близка к относительной магнитной проницаемости воздуха ($\mu_s = 1$). В результате магнитное сопротивление самого магнита вдоль оси намагничивания соизмеримо с магнитным сопротивлением воздушного зазора такой же длины. Следовательно, основная часть МДС постоянного магнита расходуется на преодоление собственного магнитного сопротивления.

2. В магнитной цепи с источником МДС в виде катушки с током (электромагнитом) введение и исключение воздушных зазоров значительно влияет на магнитный поток в цепи. Потому в магнитных цепях устройств прямого преобразования механической энергии в тепловую для повышения эффективности преобразования в качестве источников МДС целесообразнее использовать катушку с током (электромагнит), конструктивно исключив воздушные зазоры в магнитных цепях. В этом случае можно получить более интенсивные магнитные потоки при меньших значениях МДС.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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).
2. Вершинин А. С., Теремецкий Д. А. Способ повышения эффективности прямого преобразования механической энергии в тепловую // Сб. материалов VI Всерос. науч.-практ. конф. «Энергетика и энергосбережение: теория и практика»,

- Кемерово, 8–10 дек. 2021 / Под ред. Р. В. Беляевского, И. А. Лобур. – Кемерово: КузГТУ, 2022. – С. 105-1–105-5. – URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2021/energ/pages/Articles/105.pdf>.
3. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В. и др. Теоретические основы электротехники: в 3-х т.: учеб. для вузов. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – Т. 2. – 576 с.

REFERENCES

1. 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.).
2. Vershinin, A. S., & Teremeckij, D. A. (2022). Sposob povysheniya jeffektivnosti prjamogo preobrazovaniya mehanicheskoy jenerгии v teplovuju [A Method for Increasing the Efficiency of Direct Conversion of Mechanical Energy into Thermal Energy]. In R. V. Beljaevskij (Eds.) & I. A. Lobur (Eds.) *Jenergetika i jenergosberezhenie: teorija i praktika: sb. materialov [Energy and energy saving: theory and practice]* (105-1–105-5). Kemerovo: KuzGTU. (In Russ.). <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2021/energ/pages/Articles/105.pdf>. (In Russ.).
3. Demirchjan, K. S., Nejman, L. R., Korovkin, N. V., & Chechurin V. L. (2003). *Teoreticheskie osnovy jelektrotehniki: v 3 t. T. 2. [Theoretical foundations of electrical engineering (in 3 vol., Vol. 2)]*. St.-Petersburg: Piter. (In Russ.).

Поступила 05.10.2023

**THE CHOICE OF THE TYPE OF MAGNETIC CIRCUITS IN INDUCTION DEVICES
DIRECT CONVERSION OF MECHANICAL ENERGY INTO THERMAL ENERGY**

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

As the technical characteristics of permanent magnets manufactured by the industry improved, they began to be used more often in the generation of electricity, as well as in induction devices for direct conversion of mechanical energy into thermal energy. To increase the efficiency of the latter, it is necessary either to increase the frequency of interruptions of magnetic fluxes, or to increase their intensity. In this paper, a comparative analysis of unbranched magnetic circuits with sources of magnetomotive force (MDS) in the form of a permanent magnet and in the form of a coil with a current (electromagnet) is carried out in order to quantify the effect of air gaps on the change of magnetic fluxes in these circuits. The results of this comparative analysis make it possible to optimize the choice of the type of magnetic circuits in induction devices for direct conversion of mechanical energy into thermal energy.

Keywords: magnetic circuit, air gap, converter, mechanical energy, thermal energy, magnetic resistance, magnetic permeability, magnetomotive force, magnetic flux.