

EDN: WYRTYM

УДК 517.9; 537.8; 004.94

Energy-Efficient Inductors of Magnetohydrodynamic Devices for Metallurgical Purposes

Viktor N. Timofeev^{a, b},
Maksim Yu. Khatsayuk^{*a, b}, Petr A. Khomenkov^a,
Nikolay V. Timofeev^a and Dmitriy A. Mikhailov^{a, b}

*^aResearch and Production Center of Magnetic Hydrodynamics
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*^bSiberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 07.11.2024, received in revised form 21.11.2024, accepted 06.12.2024

Abstract. This article presents the results of a theoretical study of single-sided linear induction machines with a liquid metal working fluid used in metallurgy for electromagnetic pumping, dosing and mixing of melts through a large non-magnetic gap. The existing technical solutions are presented, the features, advantages, disadvantages are described and a way to optimize the equipment by using new types of winding is proposed. To solve this problem, an analytical model based on the use of Fourier series with complex coefficients is proposed. The model allows taking into account various options for the design of the inductor winding, including compensating elements. Based on the model, a comparative analysis of energy efficiency and weight and size indicators is performed through the winding coefficient determined by the first harmonic.

Keywords: magnetohydrodynamics, electromagnetic stirrer, EMS, mathematical modeling.

Acknowledgements. The study was carried out with the financial support of the Government of Krasnoyarsk Krai and the Krasnoyarsk Krai Foundation for the Support of Scientific and Scientific-Technical Activities within the framework of scientific project No. 20231121-06845 “Development of a new series of electromagnetic mixing complexes for aluminum melt with increased energy characteristics and improved weight and size indicators”.

Citation: Timofeev V. N., Khatsayuk M. Yu., Khomenkov P. A., Timofeev N. V., Mikhailov D. A. Energy-efficient inductors of magnetohydrodynamic devices for metallurgical purposes. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(8), 1035–1046. EDN: WYRTYM



Энергоэффективные индукторы магнитогидродинамических устройств металлургического назначения

В. Н. Тимофеев^{а, б}, М. Ю. Хацаюк^{а, б},

П. А. Хоменков^а, Н. В. Тимофеев^а, Д. А. Михайлов^{а, б}

^аНаучно-производственный центр магнитной гидродинамики

Российская Федерация, Красноярск

^бСибирский федеральный университет

Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. В данной статье представлены результаты теоретического исследования односторонних линейных индукционных машин с жидкометаллическим рабочим телом, используемых в металлургии для электромагнитного перекачивания, дозирования и перемешивания расплавов через большой немагнитный зазор. Представлены существующие технические решения, описаны особенности, достоинства, недостатки и предложен путь оптимизации оборудования за счет использования новых типов обмотки. Для решения этой задачи предложена аналитическая модель, основанная на применении рядов Фурье с комплексными коэффициентами. Модель позволяет учесть различные варианты исполнения обмотки индуктора, включающего компенсирующие элементы. На основе модели выполнен сравнительный анализ энергетической эффективности и массогабаритных показателей через обмоточный коэффициент, определённый по первой гармонике.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, МГД-перемешиватель, математическое моделирование.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта 20231121-06845 «Разработка новой серии комплексов электромагнитного перемешивания расплава алюминия с повышенными энергетическими характеристиками и улучшенными массогабаритными показателями».

Цитирование: Тимофеев В. Н. Энергоэффективные индукторы магнитогидродинамических устройств металлургического назначения / В. Н. Тимофеев, М. Ю. Хацаюк, П. А. Хоменков, Н. В. Тимофеев, Д. А. Михайлов // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(8). С. 1035–1046. EDN: WYRTYM

Введение

В металлургическом производстве для перекачивания, дозирования и перемешивания жидких металлов и сплавов широко применяются плоские линейные индукционные машины, оснащенные трехфазными ($m = 3$) и двухфазными ($m = 2$) обмотками [1–3].

Особенности использования линейных индукционных машин в металлургии обусловлены большими зазорами между индуктором и жидким металлом. Это требует применения многовитковых обмоток, которые необходимо укладывать активными сторонами в глубокие и широкие пазы индуктора. В таких условиях создание традиционных обмоток с многочисленными изгибами лобовых частей в различных плоскостях становится затруднительным. Особенно сложно изготавливать подобные обмотки для низких частот. Под воздействием электромагнитных сил такая обмотка может деформироваться, что приводит к перетиранию изоляции и выходу ее из строя.

Чтобы преодолеть эти трудности, были разработаны новые типы обмоток, катушки которых отличаются простотой изготовления и повышенной надежностью в эксплуатации. Эти обмотки состоят из концентрических катушек, проводники которых изгибаются на широкую сторону поперечного сечения катушки.

Существующие технические решения

В работе [1] представлен индуктор линейной индукционной машины, который включает в себя разомкнутый магнитопровод с двухфазной обмоткой и воздушным охлаждением. Фазы обмотки образованы одинаковыми плоскими катушками, разделенными на несколько секций по высоте паза. Секции катушек разных фаз расположены в разных пазах и чередуются по высоте. Такая конструкция обмотки способствует образованию продольных каналов для естественного охлаждения и позволяет сократить расход обмоточных материалов, исключая переkreщивание лобовых частей. Однако у этого устройства есть два существенных недостатка: большие поперечные габариты, обусловленные вылетом лобовых частей, и отсутствие компенсирующих элементов, которые могли бы уменьшить вредное воздействие пульсирующего магнитного потока, возникающего из-за разомкнутости магнитопровода. Известны трехфазные и двухфазные обмотки индукторов линейной индукционной машины, выполненные из концентрических катушек плоской прямоугольной формы, которые расположены на стержнях магнитопровода. В работе [2] предложена линейная индукционная машина с трехфазной обмоткой, фазы которой образованы одинаковыми концентрическими катушками плоской формы, разделенными на несколько секций. Секции катушек расположены на стержнях магнитопровода, что создает каналы для естественного или принудительного воздушного охлаждения. Такая конструкция позволяет устройству перекачивать или перемешивать высокотемпературные жидкие металлы. В работе [3] описана индукционная машина с двухфазной обмоткой, выполненной из одинаковых концентрических катушек, расположенных на стержнях магнитопровода. Секции катушек одной фазы находятся на первом и третьем стержнях, а секции другой фазы – на втором и четвертом.

Однако как трехфазная, так и двухфазная обмотки из плоских концентрических катушек, расположенных на стержнях магнитопроводов, имеют относительно низкие обмоточные коэффициенты [4, 5]. Это приводит к тому, что индукторы линейных индукционных машин с такими обмотками обладают невысокими энергетическими и электромагнитными свойствами.

Следует отметить, что индукторы с разомкнутым магнитопроводом создают в активной зоне не только бегущее, но и пульсирующее магнитное поле. Эти пульсирующие поля индуцируют токи во вторичной среде (жидком металле), что приводит к дополнительным потерям мощности и увеличению несимметричной нагрузки фаз. Для подавления или компенсации пульсирующего магнитного поля было предложено выполнить обмотку линейной индукционной машины с наличием на концах индуктора компенсирующих элементов, которые создают необходимую намагничивающую силу для компенсации пульсирующего магнитного поля.

В работе [4] представлена трехфазная обмотка линейной индукционной машины с фазной зоной 60° (электрических) и расположением катушечных групп в двух плоскостях. Особенностью обмотки является наличие за пределами активной зоны компенсирующих элементов, электрические токи которых способны компенсировать вредное влияние пульсирующего маг-

нитного потока. Роль компенсирующих элементов играют свободные стороны катушек, расположенные вне активной зоны. Также в работе [4] описана индукционная машина с двухфазной двухплоскостной обмоткой, особенностью которой является намотка в «развалку», то есть катушечные стороны делятся пополам, и лобовые части этих половинок отгибаются в разные стороны. Такая обмотка имеет хороший обмоточный коэффициент и меньший поперечный размер индуктора за счет меньшего вылета лобовых частей. По эффективности работы и электромагнитным свойствам трех- и двухфазные обмотки мало отличаются друг от друга [6]. Однако недостатком упомянутых трехфазной и двухфазной двухслойных обмоток линейных индукционных машин (ЛИМ) является различие индуктивных сопротивлений катушек, расположенных в нижнем и верхнем слоях. Это приводит к несимметрии токов в фазах и ухудшает условия охлаждения.

В работе [7] предложен индуктор линейной индукционной машины, имеющий часть пазов в активной зоне и два паза, расположенных вне активной зоны на краях индуктора. Каждая секция обмотки содержит два слоя катушек. К недостаткам этого индуктора следует отнести большие продольные размеры из-за большого количества пазов и низкий обмоточный коэффициент, что, в свою очередь, снижает энергоэффективность.

Целью данной работы было создание индуктора линейной индукционной машины для транспортировки, дозирования и перемешивания жидких металлов с меньшими массогабаритными и улучшенными энергетическими показателями.

Постановка задачи моделирования

Рассмотрим индуктор длиной $X = 2\tau$ ($p = 1$), который установлен на расстоянии δ от жидкого металла, как показано на рис. 1. При выборе длины индуктора X и других его параметров, таких как количество пазов K и ширина паза 2Δ , необходимо учитывать расположение индуктора относительно ванны с жидким металлом. Для эффективного магнитогидродинамического (МГД) перемешивания расплава металла должно выполняться следующее условие [4]:

$$\tau \geq 3\delta, \quad (1)$$

где δ – расстояние индуктора от жидкого металла.

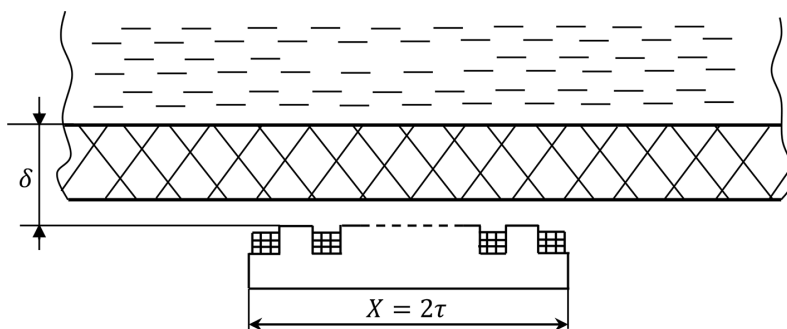


Рис. 1. Система «индуктор линейной индукционной машины – расплав»

Fig. 1. The system “inductor of a linear induction machine – melt”

На рис. 2а и 3а представлены известные индукторы ЛИМ с трехфазной (при $K = 8$, длине индуктора $X = 30\Delta$, относительной длине индуктора $\hat{X} = 30$, сдвиг фаз между токами компенсирующих элементов $\alpha_8 = -180^\circ$) и двухфазной ($K = 6$, длине индуктора $X = 20\Delta$, относительной

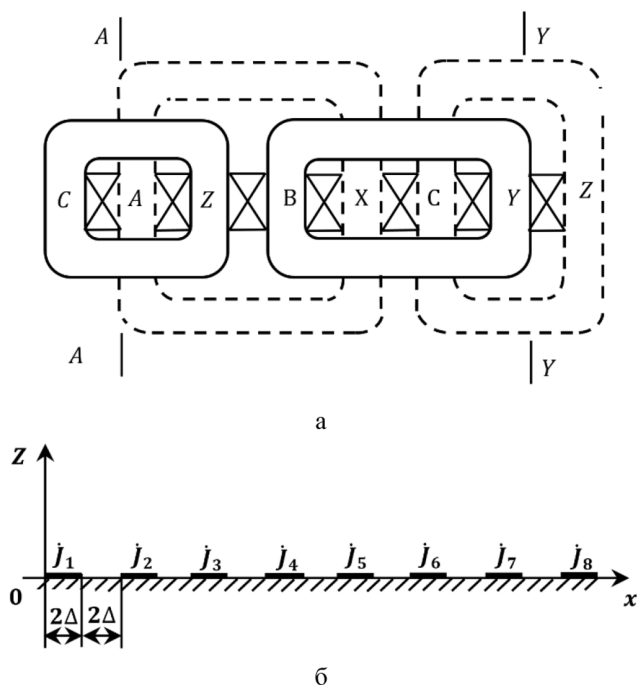


Рис. 2. Индуктор ЛИМ с трехфазной обмоткой с компенсирующими элементами
 Fig. 2. LIM inductor with three-phase winding with compensating elements

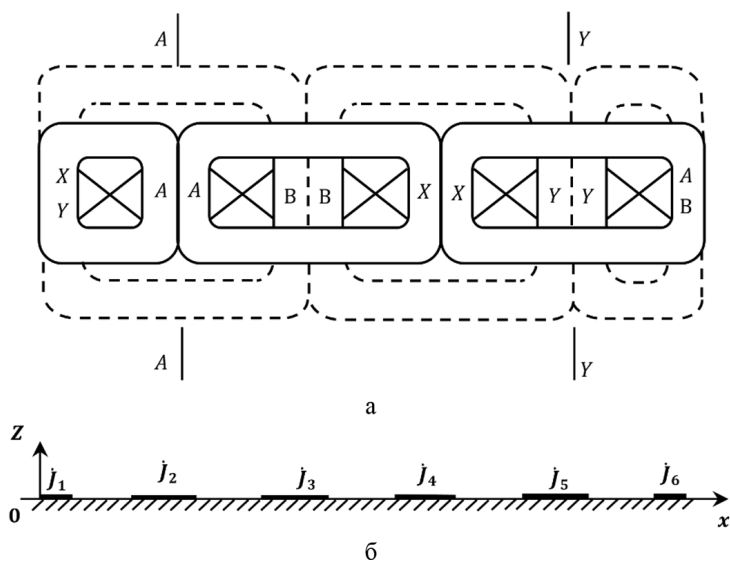


Рис. 3. Индуктор ЛИМ с двухфазной обмоткой с компенсирующими элементами
 Fig. 3. LIM inductor with two-phase winding with compensating elements

длине $\hat{X} = 20$, $\alpha_6 = -180^\circ$) концентрическими обмотками, которые имеют двухплоскостные лобовые части [7].

Длина индуктора для m -фазной обмотки ($m = 2,3$) равна

$$X = 2\Delta(2K - (4 - m)) = 2\tau, \tag{2}$$

или при знаке равенства в (1) получим, что

$$2\Delta[2K - (4 - m)] = 6\delta \tag{3}$$

Тогда число пазов индуктора K при заданной ширине паза 2Δ или величина 2Δ при заданном числе пазов K определяются соответственно как

$$K = \frac{3\delta + \Delta(4 - m)}{2\Delta}, \tag{4}$$

$$2\Delta = \frac{6\delta}{2K - (4 - m)}. \tag{5}$$

Трехфазная обмотка характеризуется шириной фазной зоны, равной 60° (электрических градусов). Это означает, что электрические токи в соседних пазах активной зоны смещены относительно друг друга по фазе на 60 градусов. Начальные фазы токов в пазах можно увидеть на векторной диаграмме (рис. 4а). Двухфазная обмотка отличается шириной фазной зоны в 90° , а начальные фазы токов в её пазах также представлены на векторной диаграмме (рис. 4б).

Электромагнитное поле, электромагнитные силы и мощности индуктора определяются линейной токовой нагрузкой $J(x)$. На рис. 2б и 3б показаны расчетные модели индукторов с трехфазной и двухфазной обмотками соответственно. В трехфазной модели для упрощения принято считать, что ширина всех пазов равна ширине зубцов и составляет 2Δ . В двухфазной модели ширина крайних пазов принимается равной Δ . В обеих моделях каждый k -ый паз представлен поверхностным слоем с комплексной линейной плотностью тока [6]:

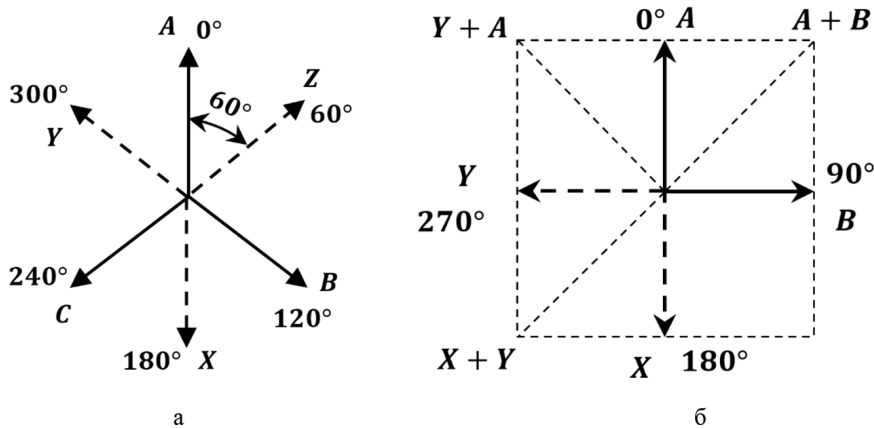


Рис. 4. Начальные фазы токов в пазах

Fig. 4. Initial phases of currents in the slots

$$j_k = J_k e^{i\Psi_k}, \quad (6)$$

где Ψ_k – начальная фаза тока в k -ом пазу, а

$$J_k = \frac{W_k I_k}{4\Delta}. \quad (7)$$

Здесь W_k и I_k – число витков и действующее значение тока в проводниках k -ого паза.

Линейную токовую нагрузку $J(x)$ можно представить в виде ряда Фурье с комплексными коэффициентами [6]. Тогда комплексный коэффициент первой гармоники в этом ряду будет равен

$$j_1 = \frac{1}{X} \int_0^X J(x) e^{-j\frac{2\pi x}{X}} dx = \sum_{k=1}^K \frac{2J_k}{\pi} \sin\left(\frac{2\pi\Delta}{X}\right) e^{-i\varphi_k}, \quad (8)$$

где фаза переменного тока в k -ом пазу:

$$\varphi_k = \frac{2\pi x_k}{X} - \Psi_k, \quad (9)$$

x_k и Ψ_k – координата центра и начальная фаза тока в проводниках k -ого паза.

Анализ результатов

Если принять линейную плотность тока во всех пазух одинаковой $J_k = J$, то модуль этого коэффициента можно представить в виде

$$J_1 = J \cdot k_{об1} \quad (10)$$

Об эффективности индуктора можно судить по обмоточному коэффициенту первой гармоники:

$$k_{об1} = \frac{2}{\pi} \sin\left(\frac{2\pi\Delta}{X}\right) \left| \sum_{k=1}^K e^{i\varphi_k} \right|. \quad (11)$$

В соответствии с расчетной моделью индуктора, представленной на рис. 2б, определим значение обмоточного коэффициента $k_{об1}$ для известного индуктора с трехфазной обмоткой. В табл. 1 указаны значения x_k , Ψ_k , и φ_k для каждого k -го паза, которые входят в формулу (9). В пазух с $k = 1$ и $k = 8$ размещены компенсирующие элементы, а в пазух с номерами $k = 2..7$ находятся токи активной зоны.

На рис. 5а изображены комплексные векторы линейной плотности тока j_k в пазух, соответствующие расчетной модели индуктора, представленной на рис. 2б. Из рисунка видно, что

Таблица 1

Table 1

k	1	2	3	4	5	6	7	8
Ψ_k	240°	0°	60°	120°	180°	240°	300°	60°
x_k	Δ	5Δ	9Δ	13Δ	17Δ	21Δ	25Δ	29Δ
φ_k	132°	60°	48°	36°	24°	12°	0°	288°

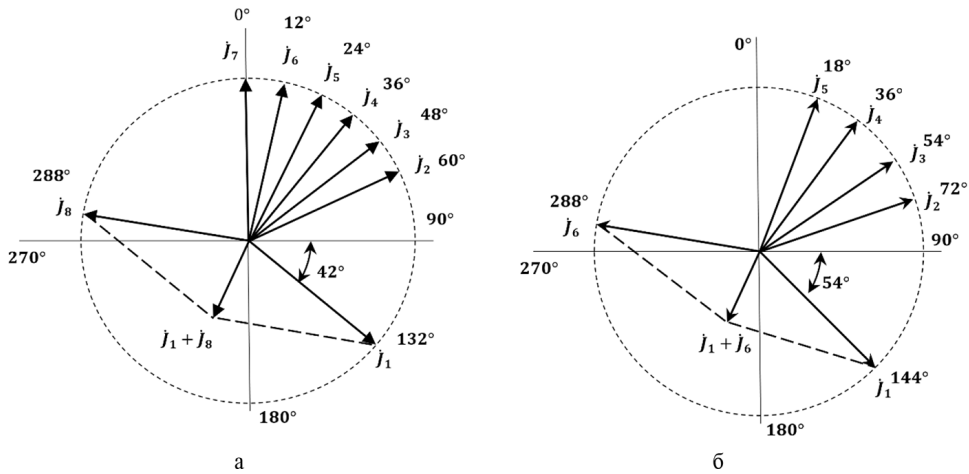


Рис. 5. Комплексные векторы линейной плотности тока в пазах

Fig. 5. Complex vectors of linear current density in slots

между векторами токов в пазах активной части существует фазовый сдвиг в 12 градусов. Кроме того, вектор суммы токов компенсирующих элементов $j_1 + j_8$ направлен против суммы токов активной части. Значение $k_{об1}$, определенное по формуле (11), составляет 0.689.

Аналогично для индуктора с двухфазной обмоткой в табл. 2 для каждого k -го паза указаны значения x_k , Ψ_k , и φ_k , входящие в формулу (9). Относительная длина этого индуктора составляет $\hat{X} = 20$. На рис. 5б показаны комплексные векторы линейной плотности тока j_k в пазах, соответствующие расчетной модели, представленной на рис. 3б. Между векторами токов в пазах активной части фазовый сдвиг равен 18 градусов, вектор суммы токов компенсирующих элементов $j_1 + j_6$ также направлен против суммы токов активной части, а значение первого члена ряда Фурье $k_{об1}$ составляет 0.678.

Уменьшая длину индуктора на величину зубцового деления (4Δ), определим обмоточный коэффициент $k_{об1}$ для каждого индуктора. Сначала проведем сокращение длины индуктора с трехфазной обмоткой. Так, «обрезав» индуктор по линии А-А (рис. 2а), получим индуктор с числом пазов $K = 7$, с относительной длиной $\hat{X} = 30 - 4 = 26$. В крайнем левом полузакрытом пазу расположены проводники фазы $A + C = Y$ (рис. 4а). Сдвиг фаз между токами компенсирующих элементов Y и Z составляет $\alpha_7 = -120^\circ$. Построив расчетную модель индуктора с $K = 7$ и определив x_k и Ψ_k для каждого паза, по (11) вычисляем обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0.842$.

Таблица 2

Table 2

k	1	2	3	4	5	6
Ψ_k	225°	0°	90°	180°	270°	45°
x_k	0.5Δ	4Δ	8Δ	12Δ	16Δ	19.5Δ
φ_k	144°	72°	54°	36°	18°	288°

Далее, «обрезав» индуктор по линии Y-Y (рис. 2а), получим индуктор с числом пазов $K = 6$, $\hat{X} = 22$, $\alpha_6 = -60^\circ$, а обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0.961$.

Аналогично определяем значения $k_{об1}$ для индукторов с $K = 8, 4, 3$. Результаты сведены в табл. 3.

Также уменьшая длину индуктора с двухфазной обмоткой от индуктора с $K = 6$, $\hat{X} = 20$ (рис. 3а) до индуктора с $K = 3$ и $\hat{X} = 8$, получим результаты, приведенные в табл. 4.

Анализируя значения α_k в табл. 2 и 3, можно сделать вывод, что сдвиг фаз между токами компенсирующих элементов в индукторе с K пазами ($K = 8 \div 3$ для трехфазной обмотки и $K = 6 \div 3$ для двухфазной обмотки) определяется как

$$\alpha_k = -180^\circ + (2m + 2 - K) \frac{360^\circ}{2m}. \quad (12)$$

Для примера определим параметры индуктора МГД перемешивателей с трехфазной и двухфазной обмотками, расположенными на расстоянии $\delta = 450$ мм от жидкого металла (рис. 1). Так, для индуктора с трехфазной обмоткой ($m = 3$), приняв число пазов $K = 6$, по (5) находим ширину паза $2\Delta = 245$ мм. По табл. 3 определяем относительную длину индуктора $\hat{X} = 22$. Действительная же длина индуктора $X = 2\tau$.

В соответствии с рис. 6а для каждого k -го паза определены значения x_k , Ψ_k , и φ_k , результаты сведены в табл. 5. На рис. 6б представлена диаграмма токов в пазах для предлагаемого трехфазного индуктора с числом пазов $K = 6$, где видно, что векторы стали более коллинеарные, а обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0.961$.

Таблица 3

Table 3

K	\hat{X}	α_k	$k_{об1}$
8	30	-180°	0,689
7	26	-120°	0,842
6	22	-60°	0,961
5	18	0°	1,036
4	14	60°	1,019
3	12	60°	0,955

Таблица 4

Table 4

K	\hat{X}	α_k	$k_{об1}$
6	20	-180°	0,678
5	16	-90°	1,002
4	12	0°	1,230
3	8	90°	1,282

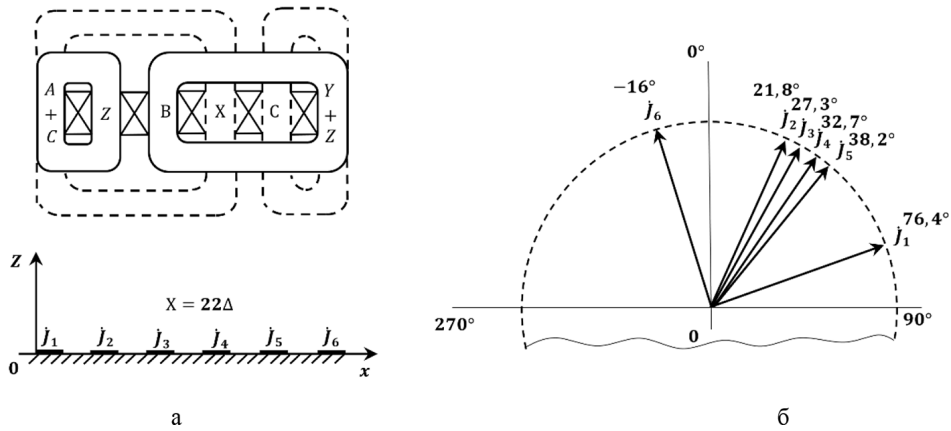


Рис. 6. Укороченный индуктор ЛИМ с трехфазной обмоткой с компенсирующими элементами
 Fig. 6. A shortened LIM inductor with a three-phase winding with compensating elements

Таблица 5
 Table 5

k	1	2	3	4	5	6
Ψ_k	300°	60°	120°	180°	240°	0°
x_k	Δ	5Δ	9Δ	13Δ	17Δ	21Δ
φ_k	76°	22°	27°	33°	38°	-16°

Аналогично и для индуктора с двухфазной обмоткой ($m = 2$), приняв число пазов $K = 4$, по (5) находим ширину паза $2\Delta = 450$ мм. По табл. 4 определяем относительную длину индуктора $\hat{X} = 12$. Тогда действительная длина индуктора $X = 2\tau$, условие (1) выполняется.

В соответствии с рис. 7а для каждого k -го паза определены значения x_k , Ψ_k , и φ_k (табл. 6, рис. 7б). Обмоточный коэффициент составил $k_{об1} = 1.23$.

Таблица 6
 Table 6

k	1	2	3	4
Ψ_k	315°	90°	180°	315°
x_k	0.5Δ	4Δ	8Δ	11.5Δ
φ_k	60°	30°	60°	30°

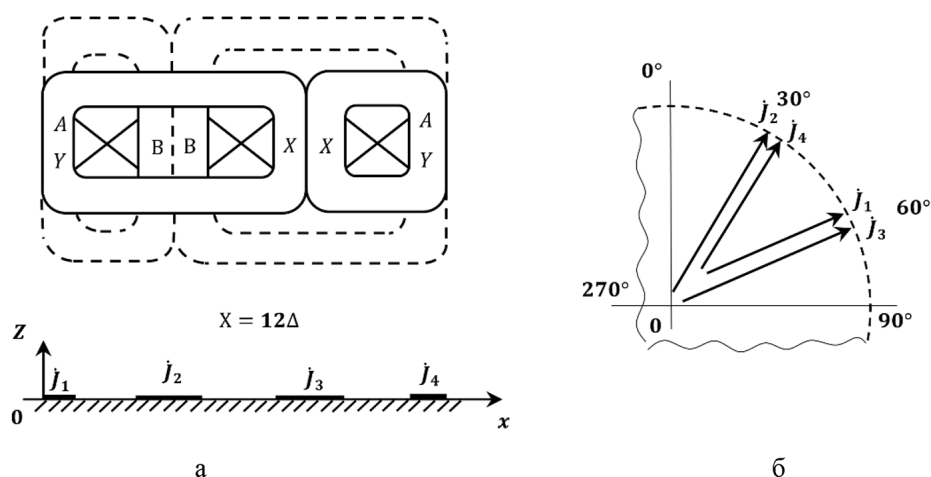


Рис. 7. Укороченный индуктор ЛИМ с двухфазной обмоткой с компенсирующими элементами

Fig. 7. A shortened LIM inductor with a two-phase winding with compensating elements

Выводы

Сравнивая массогабаритные и энергетические характеристики рассматриваемого индуктора с известными, можно сделать следующие выводы.

1. У индуктора с трехфазной обмоткой (рис. 2а) длина составляет $X = 30\Delta$, количество пазов $K = 8$, а величина обмоточного коэффициента $k_{об1} = 0.689$. Уменьшение длины индуктора с $X = 30\Delta$ до $X = 22\Delta$, что составляет 27 %, позволяет повысить энергоэффективность индуктора с $k_{об1} = 0.689$ до $k_{об1} = 0.962$, что составляет около 30 %.

2. У индуктора с двухфазной обмоткой (рис. 3а) длина $X = 20\Delta$, количество пазов $K = 6$, а величина обмоточного коэффициента $k_{об1} = 0.678$. Уменьшение длины индуктора с $X = 20\Delta$ до $X = 12\Delta$, что составляет 40 %, позволяет повысить энергоэффективность индуктора с $k_{об1} = 0.678$, до $k_{об1} = 1.23$, что составляет около 45 %.

Таким образом, применение индуктора с числом пазов K и шириной пазов 2Δ , определяемых формулами (4) и (3) соответственно, позволяет не только уменьшить массогабаритные характеристики индуктора линейной индукционной машины, но и повысить его энергоэффективность. Следует отметить, что электромагнитные мощности и силы индуктора пропорциональны квадрату тока. Поскольку обмоточный коэффициент входит в линейную токовую нагрузку (10), его увеличение также приводит к пропорциональному увеличению сил и мощностей.

Список литературы / References

[1] Патент РФ № 1809507 Кл. H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины, опубл. 15.04.93 г. БИ № 14. [RF Patent No.1809507 Cl. H02K41/025. The inductor of a linear induction machine, publ. 04/15/93, BI No. 14.]

[2] Патент РФ № 118485 Кл. H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины, опубл. 20.07.2012 г. БИ № 20. [RF Patent No.118485 Cl. H02K41/025. Inductor of a linear induction machine, publ. 07/20/2012, BI No.20.]

[3] Патент РФ № 109615 Кл. H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины, опубл. 20.10.2011 г. БИ № 29. [Patent of the Russian Federation No.109615 Cl. H02K41/025. The inductor of a linear induction machine, publ. 20.10.2011 BI No. 29.]

[4] Вольдек А.И. *Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом*. Л.: Энергия, 1970. 272. [Voldek A.I. *Induction magnetohydrodynamic machines with a liquid metal working fluid*. L.: Energiya, 1970. 272.]

[5] Вольдек А.И. *Электрические машины. Учебник для студентов высших технических заведений*. Изд. 2-е перераб. и доп. Л.: Энергия, 1974. 840. [Voldek A.I. *Electric machines. Textbook for students of higher technical institutions*. Ed. 2nd edition. and additional l.: “Energy”, 1974. 840]

[6] Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю. Анализ электромагнитных процессов магнетогидродинамического перемешивания жидких металлов. *Электричество*, 2017, 1, 35–44. [Timofeev V.N., Khatsayuk M.Y. Analysis of electromagnetic processes of magnetohydrodynamic mixing of liquid metals. *Electricity*, 2017, 1, 35–44.]

[7] Патент РФ № 2683596, Кл. H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины, опубл. 05.08.2019, БИ № 22. [RF Patent No.2683596, Cl. N 02K41/025. The inductor of a linear induction machine, publ. 05.08.2019, BI No.22]