

## Учет несимметрии плоской трехфазной линейной МГД-машины при синтезе схемы замещения

Тяпин Алексей Андреевич, аспирант

ORCID: 0000-0002-3266-5571

ФГОУ ВО Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Кинев Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, директор

ORCID: 0000-0002-3658-3549

ООО Тепловые электрические системы, г. Красноярск

**Аннотация.** В статье изложены особенности расчета несимметричного режима линейной индукционной МГД-машины по трехфазной схеме замещения. Анализ выполнен по трехфазной модели схемы замещения, построенной с применением программной среды Ansys. Линейные и нелинейные магнитные связи обмоток укороченного индуктора представлены совокупностью дискретных элементов в матричной форме. Для моделирования взаимных индуктивностей использованы пары управляемых источников. Исследование режима по схеме замещения выполнено в среде программного симулятора, построенного с применением гибридного анализа. Расчетная векторная диаграмма несимметричного режима с удовлетворительной точностью отражает неравномерное распределение токов в обмотках индуктора МГД-машины.

**Ключевые слова:** металлургическая линейная индукционная машина, математическое моделирование, электромагнитная схема замещения, векторная диаграмма токов.

## Taking into account the asymmetry of a flat three-phase linear MHD machine when synthesizing the equivalent circuit

Tyapin Alexey Andreevich, postgraduate student

FEI HE Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Kinev Evgeniy Segeevich, Candidate of Technical Sciences, Director

LLC Thermal electrical systems, Krasnoyarsk

**Abstract.** The article describes the features of calculating the asymmetric mode of a linear induction MHD machine using a three-phase equivalent circuit. The analysis was carried out using a three-phase equivalent circuit model built using the Ansys software environment. Linear and nonlinear magnetic connections of the inductor windings are represented by a set of discrete elements in matrix form. To simulate mutual inductances, pairs of controlled sources are used. The study of the equivalent circuit mode was carried out in the environment of a software simulator built using hybrid analysis. The calculated vector diagram of the asymmetric mode reflects with satisfactory accuracy the uneven distribution of currents in the inductor windings of the MHD machine.

**Keywords:** metallurgical linear induction machine, mathematical modeling, electromagnetic equivalent circuit, vector diagram of currents.

**Introduction.** Решению задачи эффективного электромагнитного перемешивания расплавов металла посвящено достаточно много работ [1 – 8]. В некоторых из них рассмотрены вопросы применения транзисторных инверторов для электропитания МГД-индукторов [9 – 11]. Однако, по-прежнему, актуальной остается задача анализа электромагнитных режимов силовых цепей индукционных перемешивателей при разных схемах обмоток линейных индукционных машин [12]. Кроме того, существенным представляется вопрос анализа режимов несимметричных индукторов с применением электромагнитной схемы замещения [13]. Электромагнитные перемешиватели применяют для выравнивания химического состава расплава алюминия в миксерах [14]. Перемешиватель для печи состоит из линейной индукционной машины (ЛИМ) и источника питания. Конструкция индуктора линейной МГД-машины, как правило, содержит медные обмотки с током до 1 кА и стальной магнитопровод [15]. Наибольшее распространение получили трехфазные индукторы. Кроме этого, применяют двухфазные и многофазные МГД-машины, которые могут иметь несколько индуктирующих обмоток [16]. Источник питания индуктора создает практически синусоидальный ток и работает на частоте около 1 Гц. Применение в перемешивателе транзисторных низкочастотных инверторов является наиболее эффективным [17]. Однако режим трехфазного источника питания – несимметричен. Это снижает надежность и осложняет достижение высокой эффективности перемешивателя.

Эскиз конструкции плоской трехфазной шестизонной МГД-машины продольного магнитного поля показан на рис. 1.

Представленная на рисунке конструкция односторонней линейной МГД-машины используется в том случае, когда нет возможности применить двухсторонние индукторы. Для повышения интенсивности электромагнитного воздействия на расплав, нередко применяют индукторы поперечного поля с концентрическими

обмотками [18]. В любом случае в укороченных индукторах присутствуют краевые эффекты и искажение магнитного поля. Поэтому для адекватного представления трехфазных и многофазных машин требуется создание соответствующих схем замещения.

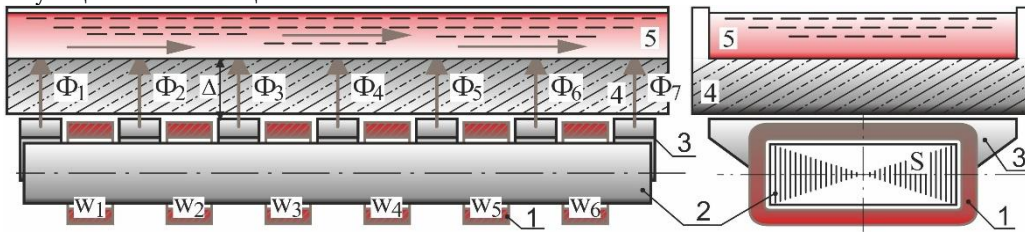


Рис. 1. Эскиз конструкции шестипольной линейной МГД-машины

**Formulation of the problem.** Вследствие несимметрии, для исследования режимов плоского укороченного трехфазного индуктора с источником питания, не удается применить традиционную однофазную электромашинную схему замещения. Наличие взаимной индукции в МГД-машине, а также краевых эффектов приводит к перераспределению мощности между обмотками фаз и искажает магнитное поле. Для верной оценки режимных параметров обмоток и силовых цепей необходимо разработать специальную трехфазную схему замещения. С применением разработанной схемы замещения необходимо исследовать распределение токов в модели. По результатам расчета следует оценить влияние магнитных связей на искажение симметрии токов в фазах и соответствие режима реальному индуктору.

**Solution.** Алгоритм построения и применения эффективных электромагнитных схем замещения весьма актуален при исследовании индукторов с уменьшенным количеством пар полюсов на активную длину машины ( $2p = 2$  и  $2p = 1$ ). Для таких машин в большей степени характерно проявление краевых эффектов. Искажение поля влияет на конфигурацию электрической и магнитной цепи, изменяет режимные характеристики. Поэтому изменение режима индуктора определяет тяговые свойства, влияет на результаты расчета и структуру схемы замещения [19]. Схема включения МГД-машины зависит от количества обмоток, числа фаз и конструкции индуктора. Характерными особенностями обладают индукционные машины с шестью сосредоточенными обмотками, которые называются шестипольными. Возможно последовательное, параллельное или комбинированное соединение секций обмоток. Однако на этапе проектирования необходимо заранее принимать решение о сечении индуктирующего провода и допустимых токах. Это в свою очередь задает режимы инвертора и его коэффициент использования мощности. Лучшие результаты проектирования обеспечиваются в том случае, когда инвертор в системе электропитания несимметричной нагрузки можно выводить на номинальное напряжение, обеспечивая при этом наибольшие допустимые токи обмоток линейной индукционной машины.

Схема включения обмоток шестипольного индуктора МГД-машины при наличии магнитных связей представлена на рис. 2. В шестипольном индукторе каждая из фаз содержит две обмотки, включенные последовательно.

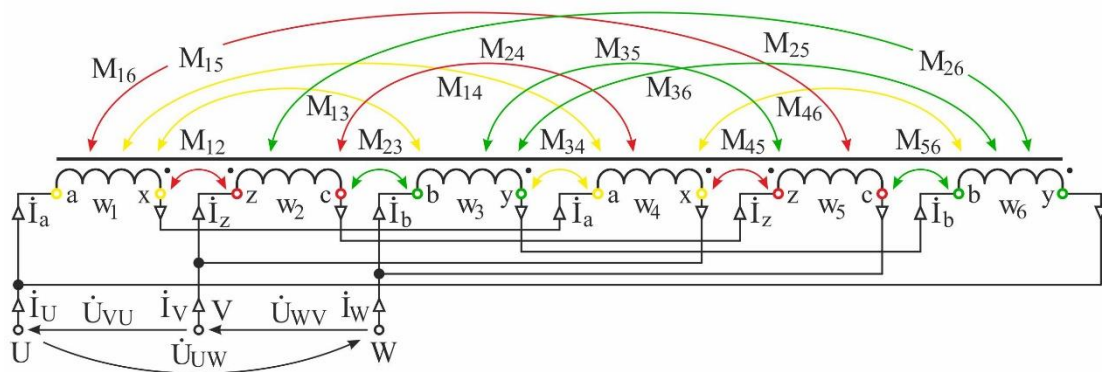


Рис. 2. Схема включения обмоток шестипольной линейной МГД-машины

В схеме реализовано наиболее предпочтительное соединение обмоток треугольником и учтены магнитные связи. Представленную схему соединения удобно исследовать с применением программной среды Ansys [20, 21]. Для анализа характера взаимных индуктивностей генерируются матричные уравнения. При расчете параметров электромагнитного поля и электрических цепей применяют средства и методы, описанные в литературе [22 – 24].

Учитывая очевидную топологию включения обмоток представленного устройства можно применить методику численно-аналитического решения, по системе уравнений для цепей питания индуктора с учетом взаимных индуктивностей. Однако ввиду насыщения стали в сильном магнитном поле анализ оказывается не простым. Поэтому более удобным представляется решение с применением схемотехнического моделирования. Результаты исследования рассмотрены в литературе [9, 25, 26] и могут быть использованы для задания режимных параметров на этапе синтеза схемы замещения. Схема подключения трехфазного шестипольного индуктора ЛИМ к транзисторному инвертору показана на рис. 3.

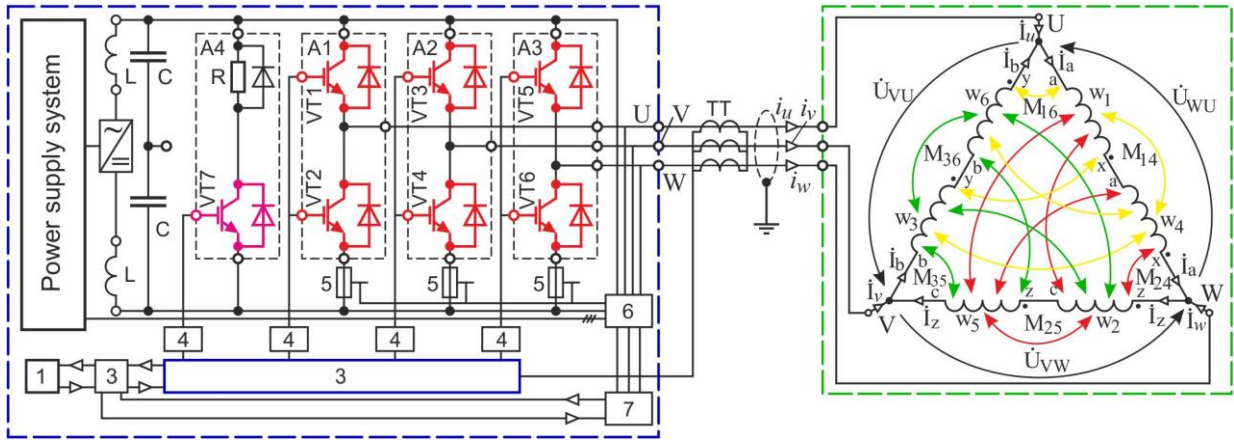


Рис. 3. Схема подключения линейной МГД-машины к инвертору

Компоненты частотного инвертора на схеме рис. 3 показаны схематично: 1 – панель управления, 2 – плата пульта управления, 3 – управляющий ШИМ-контроллер, 4 – драйвер силового модуля, 5 – предохранители силовых ключей инвертора, 6 – модуль преобразования напряжения, 7 – плата системы регулирования.

Индуктор смоделирован нелинейными индуктивностями с перекрестными магнитными связями. Степень нелинейности определяется при численном моделировании по интенсивности насыщения сердечника. Очевидно, что интенсивность магнитных связей разных секций различна. На практике магнитные связи крайних катушек, как правило, не учитывают. В модели можно предусмотреть детализированный учет всех коэффициентов, причем матрица индуктивностей оказывается существенно несимметричной и не взаимной.

При выполнении моделирования принято условие синусоидальности источника питания, позволяющее применить метод векторных диаграмм. В основу исследования положен анализ режима с использованием подсистем математического моделирования в программной среде Ansys [21]. Решение задачи разделено на ряд этапов, в ходе исполнения которых обращаются к модулю анализа электромагнитного поля. Для автоматизации и упорядочения взаимодействия подсистем применен алгоритм, представленный на рис. 4. Алгоритм реализует три этапа, сочетающих в себе конструктивный расчет индукционного устройства, анализ режима электромагнитного поля, а также построение и расчет эквивалентной схемы замещения МГД-машины. Первый этап включает подэтап расчета стационарного электромагнитного поля методом конечных элементов. Здесь производят генерацию параметрической модели, учитывающей топологию магнитной системы индукционной машины в трехмерной постановке. Далее выполняют сеточную аппроксимацию и расчет в квазистационарном электромагнитного поля. Цикл из блоков 1-5 выполняют до тех пор, пока не будут получено приемлемое интегральное усилие во вторичном элементе. На основе расчетных данных формируют массив резистивных сопротивлений катушечных групп (блок 7).

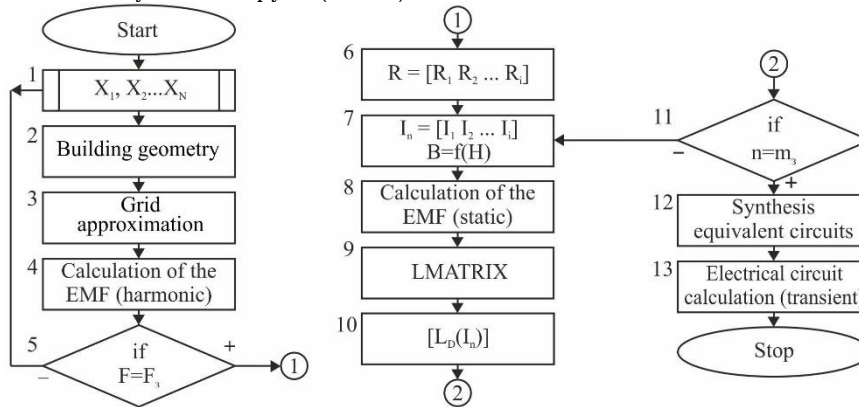


Рис. 4. Алгоритм синтеза схемы замещения

На втором этапе рассчитывают параметры схемы замещения в матрице индуктивностей  $[L_D]$  (блоки 8-11). Для этого изменяют исходную модель. В соответствии с процедурой макроса программно задают действующее значение тока для первой катушки, а во всех остальных равное нулю, имитируя отсутствие нагрузки. Через изменение энергии магнитного поля  $W_m$  определяют потокоцепления  $\psi$  с катушками (1).

$$\begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \dots \\ \psi_i \end{bmatrix} = \partial \begin{bmatrix} W_{m1} \\ W_{m2} \\ \dots \\ W_{mi} \end{bmatrix} \cdot \partial \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_i \end{bmatrix}^{-1} \quad (1)$$

Через изменение потокоцепления  $\psi$  для соответствующих катушек определяют значения наведенных ЭДС  $E_i$  (2).

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_i \end{bmatrix} = \left( \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \dots \\ \psi_i \end{bmatrix} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_i \end{bmatrix}^{-1} \right) \left( \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_i \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

Для определения параметров матрицы дифференциальных индуктивностей  $[L_D]$  используется следующая система уравнений:

$$\begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & \dots & M_{1j} \\ M_{21} & L_2 & \dots & M_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{i1} & M_{i2} & \dots & L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_i \end{bmatrix} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_i \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (3)$$

После решения системы (1) в матрице  $[L_D]$  будет определена первая строка с ненулевыми значениями. Аналогичная процедура поочередно будет выполнена для остальных катушечных групп. В результате матрица  $[L_D]$  оказывается полностью заполненной. Главная диагональ матрицы состоит из собственных индуктивностей катушек  $L_i$ , а элементы снизу и сверху – взаимные индуктивности  $M_{ij}$ . В первоначальной постановке взаимные индуктивности симметричны относительно главной диагонали, поэтому для расчетов используют только правую часть. Следует отметить, что матрица  $[L_D]$  получается для одной рабочей точки. Поэтому, если существует необходимость расчета и моделирования электромагнитных переходных процессов в индукционных машинах, то нужно исследовать поведение рассмотренных параметров, извлекая промежуточные данные в цикле из блоков 8-11  $m$ -раз для расчета рабочих точек.

При определении параметров схемы замещения используется выражение приведенного коэффициента связи, представленное ниже.

$$k' = M / \sqrt{(L_1 L_2) / (n-1)^2}, \quad (4)$$

С учетом несимметрии матрицы реактивностей относительно главной диагонали для нелинейной задачи применяют усреднение параметров, являющихся взаимными

$$k' = (M_{ij} + M_{ji}) / \sqrt{4 \cdot (L_1 L_2) / (n-1)^2}. \quad (5)$$

С учетом влияния массивного проводящего тела в виде расплавленного металла на режимные параметры, выражение коэффициента связи изменяется с применением логического исключения

$$k'(SE) = \begin{cases} M / \sqrt{(L_1 L_2) / (n-1)^2}, & SE = 0, \\ M / \sqrt{(L_1 L_2) / n^2}, & SE = 1 \end{cases} \quad (6)$$

где  $SE$  – вторичный элемент (second element),  $n$  – число разбиений.

При построении глобального описания схемы трёхфазной обмотки индуктора в машинных кодах, комбинации взаимных индуктивностей обмоток описывают в виде макромоделей и учитывают ссылками в теле модели. Необходимо заметить, что на каждом этапе исследования возможно привлечение сторонних средств моделирования, обеспечивая совместимость программного кода и соответствие получаемых результатов [27]. Такой прием необходим не только для верификации создаваемых моделей, но также позволяет сопоставлять точность, а порой и корректность работы программных сред.

В результате синтеза получают схемную модель для шестизонного МГД-индуктора, показанную на рис. 5. В схеме реализовано соединение треугольником.

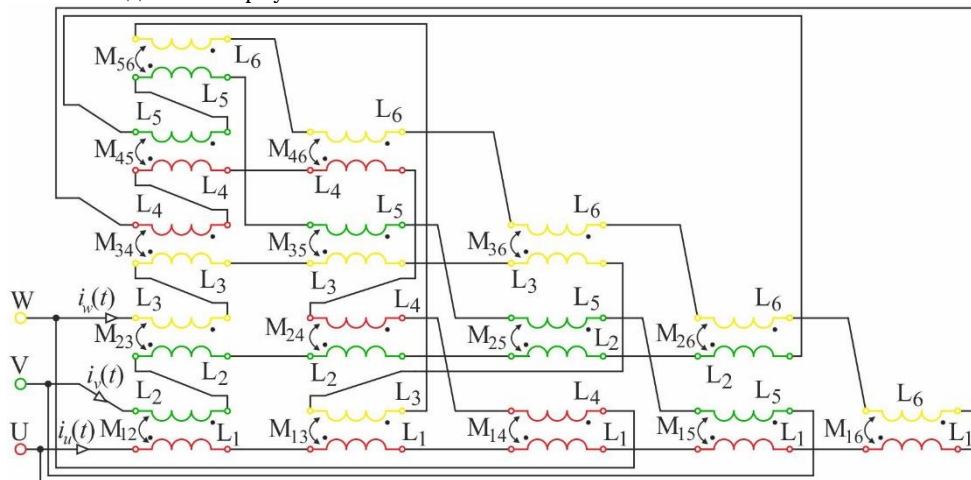


Рис. 5. Модель схемы замещения МГД-машины при соединении в треугольник

На этапе синтеза схемы замещения, для каждой дискретной пары индуктивностей применяют макромоделю. Количество макромоделей первоначально ограничено числом перекрестных связей катушек и при увеличении требований к точности может быть увеличено. Однако применение большей дискретизации ухудшает наглядность в представлении схемы. При построении эквивалентной схемы использовано правило, разделения каждой собственной индуктивности на равное число частей в соответствии с числом катушек. При этом дискретные индуктивности одной катушки включены последовательно, создавая единую эквивалентную индуктивность каждой катушки в матричном выражении (3). Необходимо заметить, что в конфигурации модели по рис. 6 число перекрёстных взаимно-индуктивных связей для всех шести обмоток должно остаться равным  $3(n - 1) = 15$  по рис. 2 и рис. 3. При заданном направлении токов в фазах, расстановка точек показывает согласное или встречное катушек. А с учетом схемы включения катушек  $U_{wv}U_{vw}$  (соответствует AZBAZB) или  $U_vWU_vW$  (AYCAYC) получают последовательное соединение обмоток  $w_1$  и  $w_4$ ,  $w_2$  и  $w_5$ ,  $w_3$  и  $w_6$  (рис. 5). Естественно, что для другого соединения обмоток, впрочем, как и для параллельного включения ветвей схемы, например  $UU_{vv}WW$ , эквивалентная схема замещения принимает несколько иные очертания.

Дальнейшая модификация схемы при генерации макромоделей для этапа схемотехнического моделирования может быть выполнена с применением эквивалентной замены каждой пары индуктивно-связанных элементов моделью на базе управляемых источников напряжения (рис. 6, а). Один из вариантов схемной модели взаимной индуктивности, построенный на базе источника напряжения, управляемого током (ИНУТ), показан на рис. 6, б. Схема довольно очевидна, поскольку позволяет моделировать возникновение в каждой катушке ЭДС или противо-ЭДС, обусловленные потокосцеплением с эквивалентным током. Ввиду значительной размерности базовой схемы (рис. 2) для шестизонного индуктора, ручная подстановка описанных моделей в схему (рис. 5) приводит к загромождению задачи и практического смысла не имеет.

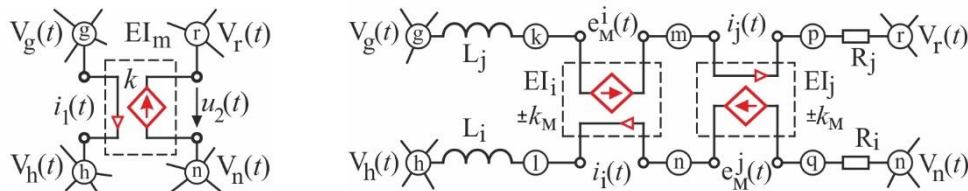


Рис. 6. Элементный базис схемных моделей

Указанная процедура может быть автоматизирована в программном симуляторе, по правилам внутреннего языка, при соблюдении численной нумерации узлов присоединения каждого элемента. Для пояснения внутренних преобразований, скрытых от пользователя современных программ далее показаны основы математического аппарата, используемого при выполнении машинных вычислений [28].

Детализация описания математической модели (рис. 6, а), применяемой для построения алгоритма анализа цепей с управляемым источником EI показана ниже. Входной ток  $i_1(t)$  направлен от узла  $g$  к узлу  $h$ , входное напряжение равно нулю, выходное напряжение  $u_2(t)$  направлено от узла  $r$  к узлу  $n$  против источника, выходной ток и источник ЭДС направлен от узла  $n$  к узлу  $r$ . Компонентные уравнения управляемого источника имеют вид:

$$u_2(t) = k_R \cdot i_1(t), \quad V_r(t) - V_n(t) = k_R \cdot i_1(t), \quad (7)$$

$$V_n(t) - V_r(t) + k_R \cdot i_1(t) = 0, \quad V_h(t) - V_g(t) = 0. \quad (8)$$

Пример матричного описания модели уединенного управляемого источника ИНУТ во временной области для базиса модифицированного узлового анализа показан ниже. Система уравнений шестого порядка для управляемого источника напряжения (рис. 6, а) составлена с учетом управляющей и управляемой ветвей (7, 8).

$$\begin{matrix} & g & h & r & n & i_1 & i_2 \\ \begin{matrix} g \\ h \\ r \\ n \\ i_1 \\ i_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & k_R & 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} V_g(t) \\ V_h(t) \\ V_r(t) \\ V_n(t) \\ i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} & (9)
 \end{matrix}$$

Записанное матричное выражение особенностей не имеет и автоматически встраивается в описание схемной модели (рис. 5), генерируемое с применением макромоделей (рис. 6, б) перед выполнением вычислительных процедур. В результате эквивалентных преобразований с применением элементарных звеньев (рис. 6, а), в вычислительном проекте генерируется система нелинейных уравнений весьма высокого порядка. Однако алгоритмы её численного итерационного анализа крайне эффективны и никаких затруднений автоматизированное решение подобных задач не вызывает. Именно поэтому применение программных сред математического моделирования получило столь широкое распространение.

Для расчета режима в модели (рис. 5) задают параметры IGBT-источника питания и определяют характеристики элементов. В численном эксперименте выполнено сравнение модели с МГД-индуктором, мощностью 55 кВт. Он предназначен для перемешивателей алюминия в печах с рабочим зазором до 500 мм. В результате получают векторную диаграмму токов в обмотках, представленную на рисунке 7.

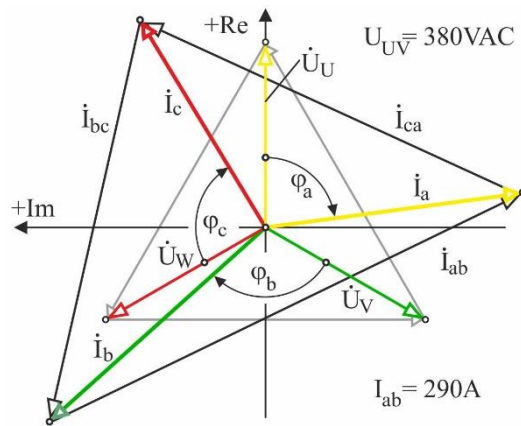


Рис. 7. Векторная диаграмма токов несимметричной МГД-машины

Вследствие слабого влияния, взаимодействием крайних обмоток можно пренебречь, тем самым упрощается задача анализа. Результат распределения токов в обмотках индуктора, показанный на векторной диаграмме при этом не меняется. Полученное при анализе режима по схеме замещения распределение токов в обмотках и фазах показывает интенсивность искажения симметрии токов питающего ЛИМ инвертора. Столь существенную несимметрию следует принимать как естественный установившийся режим работы МГД-машины. Соотношения токов и напряжений показывают распределение мощностей между фазами. Именно на продолжительную работу в таких режимах должен быть рассчитан низкочастотный транзисторный преобразователь источника питания

**Conclusion.** Представленная модель схемы замещения учитывает индуктивные связи между обмотками разных фаз. Расчет электромагнитного режима по схеме замещения позволил построить векторную диаграмму токов в обмотках и токов, потребляемых от источника питания. Характер несимметрии токов, при соединении обмоток треугольником, соответствует реальному режиму индуктора. Отличие значений токов по фазам в схеме замещения и в реальной индукционной машине не превышает 10 %. Это позволяет сделать вывод о пригодности предложенной модели трехфазной схемы замещения для исследования режимов несимметричных металлургических МГД-машин.

#### Литература:

1. Тимофеев В. Н., Хацаюк М. Ю. Анализ электромагнитных процессов магнитогидродинамического перемешивания жидких металлов. *Электричество*. 2017. № 1. С. 35-44.
2. Timofeev V.N., Khatsayuk M.Y. Theoretical design fundamentals for MHD stirrers for molten metals. *Magneto-hydrodynamics*. 2016. Т. 52. № 4. pp. 495-506.
3. Максимов А.А., Хацаюк М.Ю., Тимофеев В.Н. Анализ влияния нормальной составляющей электромагнитных сил в процессе МГД-перемешивания расплава. *Технология легких сплавов*. 2018. № 4. С. 106-112.
4. Тяпин А. А., Кинев Е.С. Двухфазная линейная индукционная МГД-машина трехзонной конструкции. *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. № 7, 2019. с. 38-48. ISSN: 2074-9635.
5. Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Тарасов Ф.Е., Фризен В.Э., Лузгин В.И., Фаткуллин С.М. Об электромагнитном воздействии на расплав алюминия при его модифицировании. *Металлургия машиностроения*. 2013. № 1. С. 008-011.
6. Бикеев Р.А., Алиферов А.И., Игнатенко А.Ю., Суяшов В.А. Энергетические параметры индукционной печи с холодным тиглем для плавки металлов. *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. 2015. № 1 (58). С. 201-212.
7. Aliferov A.I., Vlasov D.S., Promzelev V.A., Morev A.E. MHD steering of aluminum melt in cylindrical bath by means of permanent magnets system. In a collection of articles: *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM EDM 2018 - Proceedings*. 2018. pp. 782-784.
8. Sokolov I., Shvydkiy E., Bolotin K., Bychkov S., Losev G. The influence of traveling magnetic field inductor asymmetric power supply on the liquid metal flow. In a collection of articles: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2019. pp. 012002.
9. Кинев Е.С., Тяпин А.А. Особенности расчета режима сети с двусторонним питанием. *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. № 7, 2020. с. 12-18. ISSN: 2074-9635.
10. Кинев Е. С., Тяпин А. А. Схемотехника подключения IGBT-инвертора к многофазной индукционной машине // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С. 208-215. DOI: 10.30987/conferencearticle\_5c19e61d557532.76134464
11. Aliferov A.I., Kaidar A.B., Kislov A.P., Markovskiy V.P., Shapkenov B.K. Pulse-width modulation of base vectors in transistor inverter. In a collection of articles: *Proceedings of IFOST-2016 11th International Forum on Strategic Technology*. 2016. pp. 130-132.
12. Тяпин А.А., Кинев Е.С. IGBT-инвертор с биполярной синусоидальной ШИМ для двухфазной линейной МГД-машины // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международной

научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 96-102. DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422.

13. Тяпин А.А., Пантелеев В.И. К задаче синтеза схемы замещения несимметричной линейной МГД-машины. В книге: Электроэнергетика: XV всероссийская (VII международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. 2020. С. 81.

14. Tyarin A.A., Kinev E.S. Flat two-phase linear induction MHD machine for metallurgical purposes. American Scientific Journal. NY, USA. 2019, No 27. Vol.1, pp. 57-61.

15. Кинев Е. С., Тяпин А. А., Ефимов С. Н. Оценка несимметрии индукционной машины с применением метода симметричных составляющих. Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 14. № 6. 2018. с. 68 – 79.

16. Патент РФ №2708036. Способ перемешивания расплава металла и электромагнитный перемешиватель для его реализации. Головенко Е.А., Авдулов А.А., Кинев Е.С., Тимошев В.Е. Зарегистрирован 03.12.2019.

17. Тяпин А.А., Кинев Е.С. Выбор схемы инвертора для линейной металлургической МГД-машины. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. № 3, 2020. с. 23-29. ISSN: 2074-9635.

18. Бычков С. А. Обмотки индукционных машин вращательного и поступательного движения / С. А. Бычков, С. Л. Назаров, Ф. Е. Тарасов, В. Э. Фризен. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – 80 с.

19. Кинев Е. С., Тяпин А. А., Байкова К. А., Литовченко А.В. Обобщенная схема замещения укороченной линейной индукционной МГД-машины. В кн.: Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сборник научных статей VII междунар. науч. конф. 30-31 июля 2020 г. Часть 1. Казань: ООО «Конверт», 2020. с. 62-71. ISBN 978-5-6044722-0-0.

20. ANSYS 2019 R1. Updates and Changes / ANSYS, Inc. 2019, 81 p.

21. ANSYS Fluent User's Guide / ANSYS, Inc., Release 15. November 2013, 2692 p.

22. Карпов Е.А., Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю. Теоретические основы электротехники. Основы нелинейной электротехники в упражнениях и задачах. Учебное пособие. Красноярск: СФУ, 2017. 181 с. ISBN: 978-5-7638-3724-7

23. Карпов Е.А., Тимофеев В.Н., Перфильев Ю.С., Хацаюк М.Ю., Первухин М.В. Моделирование переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях. Учебно-методическое пособие. Красноярск: СФУ, 2019. 189 с. ISBN: 978-5-7638-4081-0

24. Фризен В.Э., Черных И.В., Бычков С.А., Тарасов Ф.Е. Методы расчета электрических и магнитных полей. Учебное пособие. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УФУ им. Б.Н.Ельцина, 2014. 176 с.

25. Фризен В.Э., Назаров С.Л. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий. Учебное пособие. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УФУ им. Б.Н.Ельцина, 2018. 180с.

26. Тяпин А.А., Кинев Е.С. Двухфазная индукционная нагрузка в трехфазной распределительной сети. Энергобезопасность и энергосбережение, № 1, 2020, с. 19-29. ISSN 2071-2219. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-1-19-29.

27. Чуа, Л. О., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы. Пер. с англ. М.: Энергия, 1980. – 640 с.

28. Chua L. O, Desoer C., Kuh E. Linear and nonlinear circuits / McGraw-Hill, New York. 1987. – 839 p. ISBN 0-07-010898-6.