

В.И. Милых, Л.В. Шилкова

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХФАЗНОГО ИНДУКТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЕГО ТОКА

Розглянуті теорія і результати чисельно-польового аналізу електромагнітних величин, їх фазових співвідношень і відповідних характеристик трифазного індуктора магнітного поля. Індуктор подібний до статора асинхронного двигуна і забезпечує обробку різних речовин. Це відбувається за допомогою довгастих ферромагнітних елементів, що знаходяться в його робочій камері і рухаються з обертовим магнітним полем. Розрахункова модель камери представлена анізотропним магнітним середовищем з різною магнітною проникністю по її подовжній і поперечній осям. Розрахунки характеристик виконані в режимі навантаження індуктора залежно від фазового зсуву магніторушійної сили обмотки статора відносно подовжньої осі камери і при забезпеченні незмінної величини струму цієї обмотки. Отримана сукупність характеристик повинна сприяти проектуванню і вдосконаленню індукторів розглянутого типу. Надана методика є універсальною і дозволяє відображувати їх осердя практично будь-якої форми. Бібл. 11, рис. 10.

Ключові слова: індуктор магнітного поля, статор асинхронного двигуна, теорія, чисельно-польові розрахунки, електромагнітні величини, фазові співвідношення, характеристики.

Рассмотрены теория и результаты численно-полевого анализа электромагнитных величин, их фазовых соотношений и соответствующих характеристик трехфазного индуктора магнитного поля. Индуктор подобен статору асинхронного двигателя и обеспечивает обработку различных веществ. Это происходит с помощью движущихся с вращающимся магнитным полем продолговатых ферромагнитных элементов, находящихся в его рабочей камере. Расчетная модель камеры представлена анизотропной магнитной средой с разными магнитными проницаемостями по ее продольной и поперечной осям. Расчеты характеристик проведены в режиме нагрузки индуктора в зависимости от фазового сдвига магнитодвижущей силы обмотки статора относительно продольной оси камеры и при обеспечении неизменной величины тока этой обмотки. Полученная совокупность характеристик должна способствовать проектированию и совершенствованию индукторов рассмотренного типа. Представленная методика является универсальной, так как позволяет отображать их сердечники практически любой формы. Библ. 11, рис. 10.

Ключевые слова: индуктор магнитного поля, статор асинхронного двигателя, теория, численно-полевые расчеты, электромагнитные величины, фазовые соотношения, характеристики.

Введение. В ряде отраслей для обеспечения технологических процессов перемешивания разных смесей или разделения мелких объектов с разными электромагнитными свойствами используют магнитные перемешиватели и сепараторы [1-3]. Структура и характер магнитных полей (МП), которые обеспечивают эти процессы, весьма разнообразны. Среди них находят свое место вращающиеся МП, которые возбуждаются индуктором, подобным статору трехфазного асинхронного двигателя (ТАД).

Отличием такого индуктора магнитного поля (ИМП) от ТАД является то, что вместо ротора внутри статора располагается рабочая камера (РК), через которую пропускается жидкая или сыпучая сухая смесь, нуждающаяся в обработке. Это осуществляется с помощью мелких ферромагнитных элементов (ФЭ), движущихся с вращающимся МП и создающих в РК так называемый «вихревой слой» [1, 3]. Предполагается, что ФЭ выполнены, например, в виде иголок или коротких отрезков железной проволоки, и они равномерно распределены по РК, тонкостенная оболочка которой выполняется из немагнитного материала и с МП не взаимодействует.

Анализ литературы показывает, что ИМП, несмотря на широкие возможности применения в различных отраслях промышленности, до сих пор еще недостаточно изучены. Дело в том, что исследование их электромагнитных параметров проводится, как правило, на основе теории магнитных цепей. Но в условиях весьма больших зазоров и анизотропного маломагнитного пространства представление струк-

туры ИМП несколькими однородными участками магнитной цепи является проблематичным.

Новые возможности в исследованиях и совершенствовании конструкции ИМП появились с развитием программного обеспечения численных расчетов МП. Их эффективность для ИМП уже показана в [4] при анализе МП в его поперечном и продольном сечениях на основе плоско-ортогональных расчетных моделей.

Рабочим инструментом для численного расчета МП в [4] и в данной работе принята общедоступная и распространенная программа FEMM [5].

В упомянутых работах расчеты МП ограничены рассмотрением режима идеального холостого хода (ХХ), т.е. без наличия в рабочей камере ИМП ФЭ. Эти исследования дали полезную информацию, но не могут быть конечным итогом. Более совершенные расчеты должны быть направлены на исследование электромагнитных параметров и характеристик ИМП в режиме нагрузки, которые проявят суть работы ИМП в составе главного устройства – перемешивателя или сепаратора. И здесь главной проблемой оказывается учет наполнения рабочей камеры ФЭ, обеспечивающими рабочий процесс.

Поэтому целью данной работы являются исследования характеристик ИМП в режиме его нагрузки на основе численных расчетов МП с учетом слабомагнитной среды в его рабочей камере. Для этого выведены соотношения электромагнитных параметров и фазовых величин в представленном ИМП с вращаю-

© В.И. Милых, Л.В. Шилкова

щимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой в рабочей камере, наполненной ФЭ.

Объект исследования. Электромагнитная система ИМП является такой, как и в [4]. Она показана на рис. 1 лишь ее поперечным сечением, чего достаточно для достижения цели данной работы. Здесь обозначены и дальше используются прямоугольная (x, y) и полярная системы координат (r, α) с началом отсчета угла от оси y .

Из технологических соображений заданы параметры ИМП: радиус рабочей камеры $r_{re} = 0,15$ м, по аксиальной оси активная длина $l_a = 0,3$ м. МП внутри РК распределено практически равномерно при магнитной индукции (МИ) в центре $0,24$ Тл в режиме идеального холостого хода. Для такого режима напряжение и ток статора считаются номинальными.

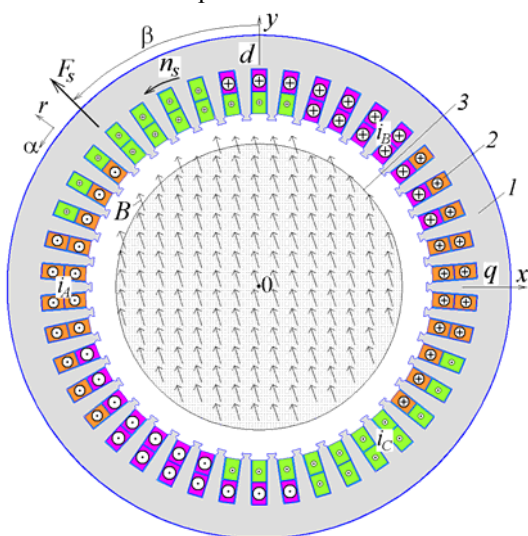


Рис. 1. Электромагнитная система ИМП: 1 – шихтованный сердечник; 2 – трехфазная обмотка; 3 – рабочая камера

Остальные параметры индуктора рассчитаны по методике, приближенной к классической для ТАД [6], с учетом отсутствия ротора. Из основных параметров индуктора представим: номинальные фазные напряжение $U_{sN} = 220$ В и ток $I_{sN} = 950$ А, частота $f_s = 50$ Гц. Он имеет числа фаз $m_s = 3$ и пар полюсов $p = 1$, число пазов $Q_s = 42$; число последовательных витков фазной обмотки $N_s = 28$. Радиус расточки сердечника индуктора r_{si} составил $0,175$ м, так как он должен быть несколько больше радиуса РК, чтобы исключить из нее кольцевой зазор с недостаточно однородным МП. Обмотка индуктора двухслойная, распределенная, с относительным укорочением $\beta_s = 18/21$, схема соединения – «звезда».

Сердечник ИМП выполнен из электротехнической стали марки 2013, толщина листов $0,5$ мм, коэффициент заполнения $K_{Fe} = 0,97$.

Основы численно-полевых расчетов. Источником вращающегося МП в ИМП является трехфазная симметричная система токов в стержнях фазных обмоток статора (рис. 1):

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cos(\omega t + \beta); \\ i_B &= I_m \cos(\omega t - 2/3\pi + \beta); \\ i_C &= I_m \cos(\omega t + 2/3\pi + \beta), \end{aligned} \quad (1)$$

где $I_m = \sqrt{2}I_s$ – амплитуда токов в стержнях обмотки статора при действующем значении фазных токов I_s ; $\omega = 2\pi f_s$ – угловая частота; t – время; β – начальная фаза токов, которая задает необходимое для конкретного режима расчета МП угловое смещение направления МДС обмотки статора F_s от оси y .

На рис. 1 показаны направления токов в стержнях обмотки при значениях $t = 0$ и $\beta = 45^\circ$, а также показано масштабированное распределение векторов МИ B в соответствующем режиме нагрузки, в котором МП вращается с частотой n_s . Видно, что МП в РК оказывается практически однородным. Что касается МДС обмотки статора F_s , то она сориентирована четко под заданным углом β .

МП индуктора в его центральном поперечном сечении описывается общеизвестным двумерным дифференциальным уравнением:

$$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu_e} \text{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (2)$$

где A_z, J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; \vec{k} – орт по аксиальной оси z ; μ_e – абсолютная магнитная проницаемость (АМП).

Инструментом исследований, которые представляются, являются численные расчеты МП методом конечных элементов по программе FEMM [5] с управлением ею созданным скриптом Lua подобно [7].

При расчете МП распределение АМП в шихтованном стальном сердечнике и немагнитном пространстве учитывается общеизвестным методом. В ИМП новой оказывается проблема учета магнитных свойств среды, находящейся в РК. Для достижения цели данной работы необходимо решение возникшей проблемы. Этому посвящен отдельный этап данной работы, который предварим описанием состояния среды РК.

Принцип действия ИМП и магнитное состояние его РК. Продолговатые ФЭ в РК будут стремиться располагаться по силовым линиям МП и, значит, по направлению векторов МИ. Однако под воздействием тормозящего действия обрабатываемой среды между направлениями вращающихся вместе магнитного поля и элементов должно образоваться некоторое угловое смещение. Это является условием возникновения электромагнитного момента (ЭММ) M_{em} , воздействующего на ФЭ, от чего зависят интенсивность и качество технологической обработки различных смесей.

По сути, ЭММ в ИМП является реактивным, а принцип действия ИМП соответствует принципу действия синхронного реактивного двигателя [8]. По аналогии с синхронными машинами, в РК по направлению ориентации ФЭ назначается продольная ось d , а перпендикулярно ей – поперечная ось q . В установившемся рабочем режиме оси вращаются вместе с этими элементами и МП.

На рис. 1, где априори показан мгновенный «снимок» электромагнитных величин, продольная ось d совпадает с осью y . Векторы магнитной индукции B смещены по углу от оси d в сторону вращения МП, а вектор МДС F_s «идет» впереди, как «ведущий» за собой все остальное.

Массив согласованно ориентированных ФЭ приводит к различию магнитных свойств внутри РК по разным направлениям, что выражается магнитной анизотропией. По продольной d и поперечной q осям, обозначенным на рис. 1, оказываются разные значения составляющих АМП μ_d и μ_q . Они зависят от конфигурации, взаимного расположения и концентрации ФЭ.

Определение эквивалентных магнитных свойств рабочей камеры ИМП. Эта задача в описанных условиях является весьма сложной и не строго детерминированной ввиду возможной «стихий» распределения ФЭ в РК. Поэтому, в принципе, на данном этапе достижимым представляется ее приближенное решение. Здесь предложена идеализированная модель заполнения РК и разработан соответствующий метод определения эквивалентных ее магнитных свойств, которые можно использовать в расчетной модели ИМП в целом.

Исходными допущениями для формирования магнитных свойств РК являются:

- все ФЭ в ИМП располагаются параллельно друг другу, что является естественным под воздействием однородного МП;
- ФЭ по объему РК распределены равномерно с задаваемым смещением друг относительно друга;
- магнитные свойства среды в поперечном сечении РК являются анизотропными по взаимно перпендикулярным осям: продольной d и поперечной q ;
- дискретная магнитная среда РК заменяется сплошной средой с эквивалентными магнитными проницаемостями μ_d и μ_q по указанным осям;
- МП в РК является достаточно слабым и свойства ФЭ соответствуют начальным участкам их кривых намагничивания, поэтому значения μ_d и μ_q при расчете МП в ИМП в целом практически не изменяются.

В описанной ситуации задача определения составляющих АМП μ_d и μ_q при заданных размерах и взаимном расположении ФЭ решается на основе численных расчетов МП в идеализированной модели заполнения РК, показанной на рис. 2.

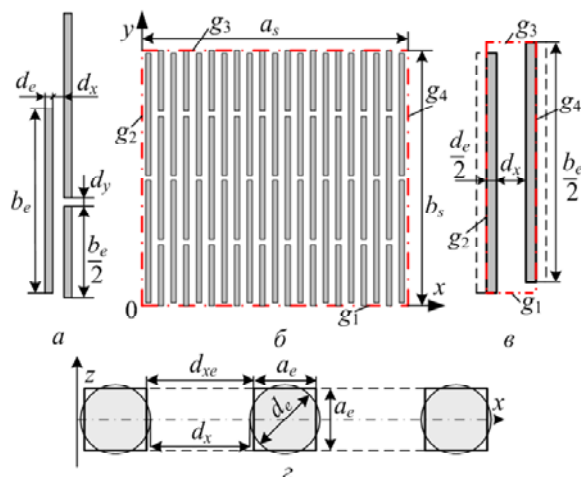


Рис. 2. Расчетная модель рабочей камеры

На рис. 2,а дана базовая тройка ФЭ с обозначением необходимого минимума размеров, которые могут варьироваться. Из этих элементов строится заполнение всей расчетной модели, как, например, на

рис. 2,б. В общем пространстве РК, из которого выделена расчетная модель, линии границ g_1 , g_2 , g_3 и g_4 должны рассматриваться как линии симметрии или периодичности. В принципе, минимальной может быть расчетная модель, показанная на рис. 2,в, но она не столь наглядна, как на рис. 2,б.

Ключевыми для формирования заполнения рабочей камеры являются диаметр d_e и высота b_e ФЭ, а также зазоры d_x и d_y между ними. У верхней и нижней границ располагаются половинки полных элементов.

Для полного воспроизведения расчетной модели (рис. 2,б) достаточно еще задать число элементов n_y по ее высоте. На рис. 2,б для наглядности дан вариант при $n_y = 2$, но правильные результаты получатся и при ином значении n_y – главное, чтобы соблюдались заявленные условия симметрии. Остальные параметры РК, включая и число элементов m_x по ширине РК, находились с условием, что $a_s \approx b_s$.

Для обеспечения работы программы FEMM составлен скрипт Lua, который автоматически рассчитывает параметры РК, строит ее геометрическую модель и организует дальнейшие расчеты, как это представлено, например, в [7] и ряде других работ авторов этой статьи.

В поперечном сечении расчетной модели (рис. 2,б) МП описывается уравнением (2) и рассчитывается как плоскопараллельное. Это значит, что по аксиальной координате структура модели не должна меняться, что не выполняется при круглых сечениях ФЭ в плоскости xz (рис. 2,с). Чтобы обойти это, круглые сечения заменяются квадратными со стороной a_e , определяемой из условия сохранения площади сечения, а именно: $a_e = 0,5\sqrt{\pi}d_e$. Соответственно пересчитывается эквивалентный зазор между элементами по ширине камеры $d_{xe} = d_x + d_e - a_e$.

Для расчетной модели вычисляются общая площадь поперечного сечения $S_s = a_s b_s$, а также ее часть, занятая ферромагнитными элементами $S_e = n_y m_x a_e b_e$. Тогда коэффициент заполнения рабочей камеры по площади поперечного сечения составляет: $K_{Fes} = S_e/S_s$.

Предполагается, что по аксиальной оси z (рис. 2,с) ФЭ распределены с той же плотностью, что и в поперечном сечении. Тогда по этой оси будет правомерным тот же коэффициент заполнения K_{Fes} , что будет учитываться при расчете МП в двухмерной постановке.

Общее заполнение объема РК ФЭ характеризует объемный коэффициент заполнения $K_{Fev} = K_{Fes}^2$.

Составляющие магнитной проницаемости по двум осям РК определяются через расчет магнитных полей, ориентированных по ним. Такие МП формируются посредством задания соответствующих граничных условий на границах расчетной модели РК (рис. 2,б) для ВМП A_z .

Граничные условия для формирования продольного МП имеют вид:

$$A_z|_{g_2} = 0; A_z|_{g_4} = B_{av}a_s; \frac{\partial A_z}{\partial y}|_{g_1} = 0; \frac{\partial A_z}{\partial y}|_{g_3} = 0. \quad (3)$$

Для формирования поперечного МП граничные условия меняются местами, а именно:

$$A_z|_{g_1} = 0; A_z|_{g_3} = B_{av}b_s; \frac{\partial A_z}{\partial x}|_{g_2} = 0; \frac{\partial A_z}{\partial x}|_{g_4} = 0. \quad (4)$$

В (3) и (4) фактором возбуждения МП является предполагаемое среднее значение МИ B_{av} в РК.

Внутри области расчетной модели (рис. 2,б) МП рассчитывается по программе FEMM методом конечных элементов посредством решения двухмерного дифференциального уравнения (2). При этом учитываются нелинейные магнитные свойства ФЭ, а также разреженная структура области расчета по аксиальной оси – посредством определенного коэффициента заполнения K_{Fes} .

Для тестового варианта взяты значения величин: $d_e = 1$ мм; $b_e = 23,8$ мм; $d_x = 1,43$ мм; $d_y = 1$ мм; $n_y = 1$. Расчетами по тривиальным формулам получено: $m_x = 9$; $a_s = 21,9$ мм; $b_s = 24,8$ мм; $a_e = 0,89$ мм; $d_{xe} = 1,54$ мм; $K_{Fes} = 0,35$; $K_{Fev} = 0,122$. Именно для такой структуры расчетной модели на рис. 3 изображены картины МП при продольном (а) и поперечном (б) возбуждении.

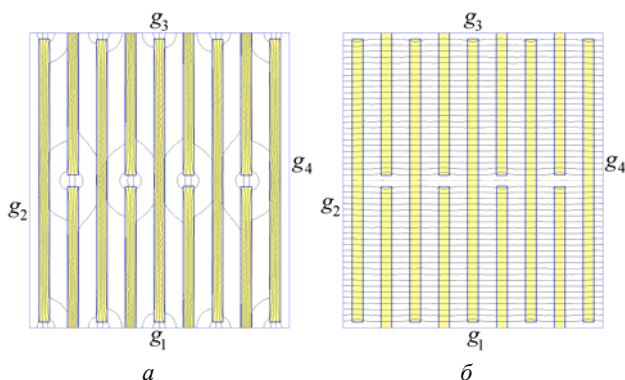


Рис. 3. Расчетная модель с картинами продольного (а) и поперечного (б) магнитных полей

По магнитному полю определяются координатные составляющие его напряженности H_x и H_y по осям x и y , а по ним – падения магнитного напряжения по вертикальной и горизонтальной линиям:

$$U_{magd} = \int_0^{b_s} H_y dy; \quad U_{magq} = \int_0^{a_s} H_x dx. \quad (5)$$

Тогда средние значения составляющих этой напряженности по соответствующим осям:

$$H_{yav} = U_{magd} / b_s; \quad H_{xav} = U_{magq} / a_s \quad (6)$$

дают продольную и поперечную составляющие магнитной проницаемости для эквивалентной среды:

$$\mu_{rd} = \frac{B_{av}}{H_{yav}} \cdot \frac{1}{\mu_0}; \quad \mu_{rq} = \frac{B_{av}}{H_{xav}} \cdot \frac{1}{\mu_0}. \quad (7)$$

Использование здесь магнитной постоянной μ_0 позволяет сразу перейти к относительной магнитной проницаемости (для идентификации этого добавлен индекс r).

Программа FEMM обеспечивает получение значений величин U_{magd} , U_{magq} , H_{yav} и H_{xav} с помощью специальной процедуры, включенной в скрипт Lua. В итоге получено: $U_{magd} = 1420$ А; $H_{yav} = 19090$ А/м; $\mu_{rd} = 10$; $U_{magq} = 8640$ А; $H_{xav} = 122600$ А/м; $\mu_{rq} = 1,5$.

В общей области расчета (рис. 1) магнитное поле описывается тем же уравнением (2) с заданием в РК выявленной магнитной анизотропии по продольной и поперечной осям. Распространение МП ограничива-

ется внешней поверхностью сердечника индуктора, где задано граничное условие Дирихле: $A_z = 0$.

В качестве примера на рис. 1 показано векторное поле МИ, полученное в режиме нагрузки при уже обусловленных значениях магнитной проницаемости, времени и угла $\beta = 45^\circ$. При этом значение тока I_s составляло 455 А при фазном напряжении обмотки статора U_s , равном 220 В. В центральной точке рабочей камеры МИ составила 0,36 Тл.

Количественно-фазовые соотношения электромагнитных величин в ИМП. Определение или задание указанных соотношений является важным и необходимым при расчете представляемых далее электромагнитных параметров и характеристик ИМП.

По результатам расчета МП программными средствами FEMM [5] получается ЭММ через тензор магнитного натяжения Максвелла по формуле [9]:

$$M_{em} = \frac{l_a}{\mu_0(r_s - r_r)} \int_{S_\delta} B_r B_\alpha r dS, \quad (8)$$

где B_r и B_α – радиальная и угловая составляющие МИ; r_r и r_s – радиусы окружностей, ограничивающих площадь сечения зазора S_δ со сторон РК и статора.

Основой анализа электромагнитных величин ИМП является оперирование с магнитным потокосцеплением (МПС) фазной обмотки статора. Эта величина вычисляется по распределению ВМП [9] через численную реализацию выражения:

$$\Psi = \frac{N_s I_a}{S_\phi} \int A_z dS \approx \frac{N_s I_a}{S_\phi} \sum_{j=1}^{K_\phi} A_{z,av,j} \Delta S_j, \quad (9)$$

где S_ϕ , K_ϕ – площадь сечения всех конечных элементов с током в фазной зоне обмотки статора и число таких элементов; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе площади ΔS_j .

В программе FEMM есть специальная процедура, обеспечивающая определение МПС (9), которая автоматизирована под управлением скриптом Lua [5, 9].

После расчета МП при его фиксированной структуре «маска» фазной обмотки статора условно располагается поочередно в пазах статора в разных угловых позициях α_k со сдвигом на зубцовое деление.

В каждой позиции «маски», аналогично изложенному в [10], определяется МПС по формуле (9) по всем пазам фазной обмотки и получается дискретная угловая функция МПС:

$$\Psi_k(\alpha_k), \quad k=1,2,\dots,K, \quad (10)$$

где достаточное число позиций $K = Q_s/2$.

Эта периодическая функция раскладывается в гармонический ряд Фурье [9, 10], но для цели данной статьи достаточно первой гармоники МПС:

$$\Psi = \Psi_m \cos(\alpha + \gamma_\Psi). \quad (11)$$

Ввиду вращения МП с угловой скоростью $\Omega_s = \omega/p$ в (11) делается замена α на $\Omega_s t$, и для неподвижной фазной обмотки МПС становится временной функцией:

$$\Psi = \Psi_m \cos(\omega t + \gamma_\Psi). \quad (12)$$

Соответственно закону электромагнитной индукции из (12) получается ЭДС фазной обмотки:

$$e = \omega \Psi_m \cos(\omega t + \gamma_{\Psi} - \pi/2), \quad (13)$$

где выделяются ее амплитуда $E_m = \omega \Psi_m$ и начальная фаза $\gamma_e = \gamma_{\Psi} - \pi/2$.

Тогда действующее значение ЭДС фазной обмотки статора:

$$E_a = \sqrt{2} \pi f_s \Psi_m. \quad (14)$$

Учитываемый набор электрических величин в фазной обмотке статора представим с помощью схемы замещения, которая изображена на рис. 4.

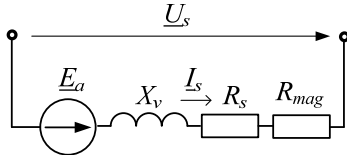


Рис. 4. Электрическая схема замещения фазной обмотки статора

Кроме фазных напряжения U_s и тока I_s на рис. 4 расположен идеальный источник уже определенной ЭДС E_a , а также идеальные индуктивный и резистивный элементы, характеризующиеся соответствующими сопротивлениями: активные сопротивления R_s и R_{mag} отображают электрические и магнитные потери мощности, реактивное сопротивление X_v – лобовое рассеяние МП обмотки статора. Прочие потоки рассеяния учтены уже в МПС Ψ (9), определяемом по всему МП в прямолинейной части обмотки статора.

Сопротивления R_s и X_v вычисляются соответственно классическим методам расчета ТАД [6].

Для учета мощности магнитных потерь P_{mag} в схему на рис. 4 и введено активное сопротивление:

$$R_{mag} = \frac{P_{mag}}{m_s I_s^2}, \quad (15)$$

а эта мощность определяется в сердечнике статора по уточненной методике [11] после расчета МП.

Для схемы замещения (рис. 4) уравнение равновесия напряжений в символической форме имеет вид:

$$\underline{U}_s = -\underline{E}_a - \underline{E}_v + \underline{U}_R, \quad (16)$$

где представлены ЭДС от магнитного потока лобового рассеяния и падение напряжения на активных сопротивлениях

$$\underline{E}_v = -jX_v I_s; \quad \underline{U}_R = (R_s + R_{mag}) I_s. \quad (17)$$

Количественные и фазовые соотношения уже упомянутых и еще ряда электромагнитных величин предоставим с помощью векторной диаграммы (ВД) на рис. 5,а. Она строится по выявленным соотношениям электромагнитных величин в ИМП с соблюдением общепринятых правил электротехники.

Отсчет угловых координат проводится от продольной оси РК d , которая, как и на рис. 1, проведена вертикально. Относительно нее под заданным углом β проводится вектор тока \underline{I}_s , и под углом начальной фазы $\gamma_{\Psi a}$, находящейся в (12), проводится вектор МПС $\underline{\Psi}_a$. Вектор МПС лобовой части обмотки $\underline{\Psi}_v$ параллелен вектору \underline{I}_s . Вектор ЭДС \underline{E}_a соответственно (13) отстает по фазе от $\underline{\Psi}_a$ на 90° , поэтому входящий в (16) вектор $-\underline{E}_a$ опережает $\underline{\Psi}_a$ на 90° . Согласно (17), вектор $-\underline{E}_v$ перпендикулярен, а вектор \underline{U}_R параллелен вектору тока \underline{I}_s . Вектор напряжения \underline{U}_s строится на основе

суммирования векторов по (16). Относительно вектора тока \underline{I}_s векторы $-\underline{E}_a$ и \underline{U}_s получили опережающие фазовые сдвиги φ_{Ea} и φ_s , соответственно.

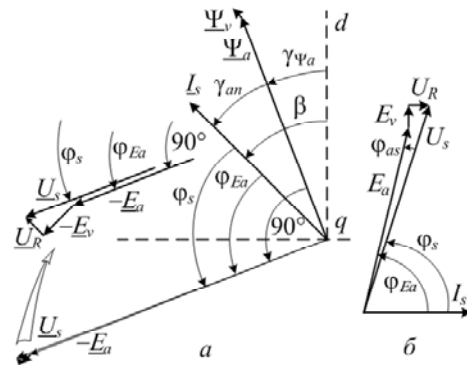


Рис. 5. Векторная диаграмма электрических и магнитных величин фазной обмотки статора

Значение ЭДС E_a находится по (14), а по ВД находится упомянутый угол

$$\varphi_{Ea} = 90^\circ - \gamma_{an} = 90^\circ - \beta + \gamma_{\Psi a}. \quad (18)$$

Тогда можно найти \underline{U}_s и φ_s . Для наглядности этого используется упрощенный (повернутый и без масштаба) фрагмент ВД (рис. 5,б).

Активная и реактивная составляющие ЭДС E_a :

$$E_{a,a} = E_a \cos \varphi_{Ea}; \quad E_{a,r} = E_a \sin \varphi_{Ea}. \quad (19)$$

Аналогичные составляющие напряжения U_s :

$$U_{s,a} = E_{a,a} - U_R; \quad U_{s,r} = E_{a,r} - E_v \quad (20)$$

дают действующее значение фазного напряжения и его фазовый сдвиг относительно тока:

$$U_s = \sqrt{U_{s,a}^2 + U_{s,r}^2}; \quad \varphi_s = \arctg(U_{s,r}/U_{s,a}). \quad (21)$$

В качестве примера представим результаты тестового расчета, проведенного применительно к рис. 1: $P_{mag} = 1906$ Вт; $R_{mag} = 0,00304$ Ом; $\Psi_a = 0,938$ Вб; $\gamma_{\Psi a} = 21,09^\circ$; $E_a = 208$ В; $\varphi_{Ea} = 66,09^\circ$; $\varphi_s = 65,77^\circ$; $E_v = 10,1$ В; $U_R = 6,8$ В; $M_{em} = 324$ Н·м. Отдельно определены значения $R_s = 0,00968$ Ом и $X_v = 0,022$ Ом.

Именно по таким данным априори показана на рис. 1 картина распределения МИ и построена ВД на рис. 5,а. Дополнительно на рис. 6 изображена картина силовых линий МП и взаимное соответствие упоминавшихся углов поворота разных величин для рассмотренного режима нагрузки ИМП.

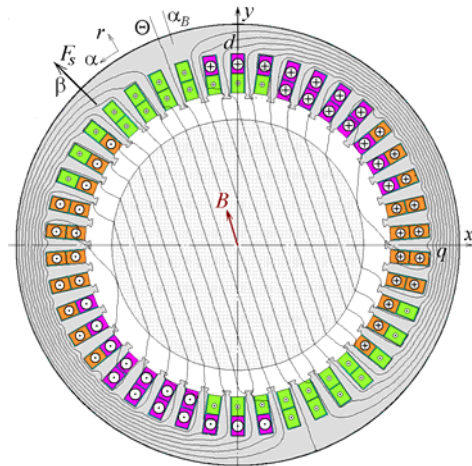


Рис. 6. Картина МП в виде силовых линий и угловые отметки для разных величин

Обращает на себя внимание тот факт, что угол γ_{ψ_a} получился существенно меньше, чем β . В то же время было выявлено, что при задании $\beta = 0$, значение γ_{ψ_a} получилось также равным нулю и это соответствовало режиму XX, так как ЭММ по (8) был равен нулю. Угол поворота вектора МПС $\underline{\Psi}_a$ от режима XX в режим нагрузки, согласно теории синхронных машин [8], это угол нагрузки. Поэтому угол γ_{ψ_a} на рис. 5,а – не что иное, как угол нагрузки ИМП, т.е. $\Theta = \gamma_{\psi_a}$, что отображено и на рис. 6.

По координатным составляющим вектора МИ в центре РК определен угол поворота вектора \vec{B} :

$$\alpha_B = \arctg(B_x / B_y), \quad (22)$$

который составил $15,1^\circ$.

Энергетические параметры ИМП. После расчета МП и определения количественных и фазовых соотношений электромагнитных величин уже достаточно просто можно вычислить энергетические параметры ИМП.

Мощность электромагнитная в электрическом выражении:

$$P_{em} = m_s E_a I_s \cos \varphi_{Ea}. \quad (23)$$

С другой стороны, мощность электромагнитная в механическом выражении может рассматриваться как выходная или полезная мощность:

$$P_{em} = P_{out} = M_{em} \Omega_s. \quad (24)$$

Мощность входная или затраченная:

$$P_s = m_s U_s I_s \cos \varphi_s, \quad (25)$$

где коэффициент мощности $\cos \varphi_s$ определяется по вычисленному в соответствии с (21) фазовому сдвигу напряжения и тока обмотки статора.

Потери мощности составляют из мощности электрических потерь в обмотке статора

$$P_{el} = m_s R_s I_s^2 \quad (26)$$

и упоминавшейся мощности магнитных потерь P_{mag} в сердечнике статора.

Коэффициент полезного действия (КПД) ИМП:

$$\eta = P_{out} / P_{in}. \quad (27)$$

Характеристики ИМП. Представленная теоретическая база позволяет рассчитать целый ряд характеристик ИМП, связывающих его электромагнитные и энергетические параметры, а также фазовые соотношения соответствующих величин в режиме изменяющейся нагрузки. Из множества фигурирующих величин при изучении характеристик традиционно выделяются базовые, а остальные анализируются.

В ИМП к базовым можно отнести напряжение U_s и ток I_s обмотки статора, являющиеся для него входными величинами. При этом возможны два варианта эксплуатации с изменением нагрузки:

1) неизменным поддерживается действующее значение тока I_s , а напряжение и прочие величины рассчитываются;

2) неизменным поддерживается действующее значение напряжения U_s , а ток и иные величины рассчитываются.

В первом случае возможна эффективная эксплуатация ИМП на предельно допустимом уровне по электрическим потерям мощности обмотки статора и

ее нагреву, однако необходим соответствующий регулятор напряжения. Во втором случае для питания можно использовать имеющуюся электросеть, но обмотка статора и ИМП могут работать в заданном диапазоне нагрузки с недостаточным использованием.

В данной работе рассматривается первый вариант эксплуатации ИМП – со стабилизацией значения тока обмотки статора, оставив второй вариант для продолжения исследований в следующих работах.

При стабильном значении тока обмотки статора изменение механической нагрузки при изменении заполнения РК приводит к изменению ЭММ за счет изменения угла нагрузки и других фазовых соотношений. Из них для расчета характеристик варьируемой величиной – аргументом удобно принять угол обобщенной начальной фазы токов обмотки статора β , входящий в (1).

Тогда решение задачи расчета характеристик становится достаточно простым: при задании действующего значения тока I_s и угла β проводится расчет МП и по методике, выражающейся формулами от (1) до (27) получается целый ряд необходимых величин.

Для получения различных характеристик из рассчитанных числовых массивов разных величин впоследствии какие-то можно принимать в качестве самостоятельного аргумента, а из прочих – назначать интересные расчетчика функции.

В конкретном расчетном примере характеристик принято базовое значение тока $I_s = 455$ А, которое уже использовалось в тестовом расчете при $\beta = 45^\circ$ и $U_s = 220$ В.

Чтобы получить полные характеристики, принят диапазон угла β от 0 до 90° , который для достаточной «гладкости» графиков проходил с шагом 5° .

Основная часть полученных характеристик представлена на рис. 7 – 10. Их суть проявляется обозначенными на графиках величинами.

Обратим внимание на то (рис. 8), что углы β и Θ совпадают по значениям в крайних точках – 0 и 90° . В этом случае ЭММ равен нулю, то есть имеет место режим XX. Максимальное значение ЭММ соответствует углу $\beta = 46^\circ$ (рис. 7), и при этом критический угол нагрузки Θ_{cr} составляет $22,5^\circ$ (рис. 8).

По теории синхронных машин в диапазоне угла Θ от 0 до Θ_{cr} режим работы ИМП является устойчивым. Чтобы иметь двукратный запас по ЭММ, номинальным можно считать угол нагрузки Θ_{nom} , равный примерно 7° , что отвечает углу $\beta = 17-18^\circ$.

На рис. 7 видно, что от XX до этого угла напряжение, МПС, ЭДС и сопротивление R_{mag} примерно стабильны – при некотором уменьшении с ростом нагрузки ИМП. То же можно сказать о магнитных потерях (рис. 9), а электрические потери неизменны по определению, ввиду стабильности тока.

Электромагнитная мощность в электрическом (23) и механическом (24) выражениях численно оказалась идентичной (рис. 9), что можно рассматривать как проверку правильности полученных фазовых соотношений электрических величин. Форма графиков этих мощностей, естественно, подобна графику ЭММ.

Характеристики коэффициента мощности и КПД (рис. 10) показывают естественный их рост с ростом

нагрузки ИМП. Уровень КПД в диапазоне устойчивой работы соответствует классическим электрическим машинам малой и средней мощности. А вот уровень коэффициента мощности оказывается весьма малым, что объясняется наличием больших немагнитных зазоров и маломагнитной средой в РК.

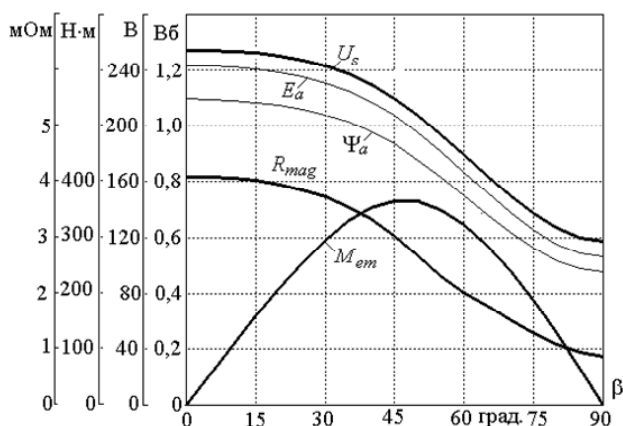


Рис. 7. Характеристики напряжения, МПС, ЭДС, ЭММ и активного сопротивления для учета магнитных потерь

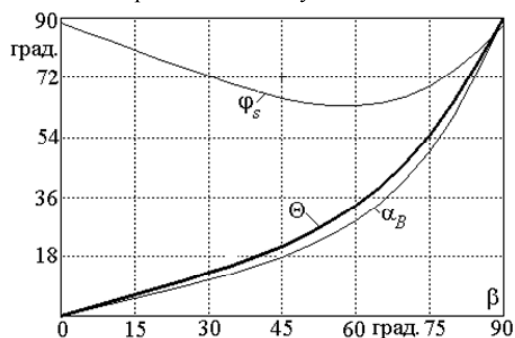


Рис. 8. Характеристики фазовых соотношений в ИМП

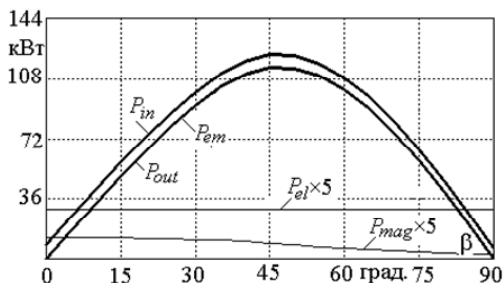


Рис. 9. Характеристики мощностей и потерь мощности

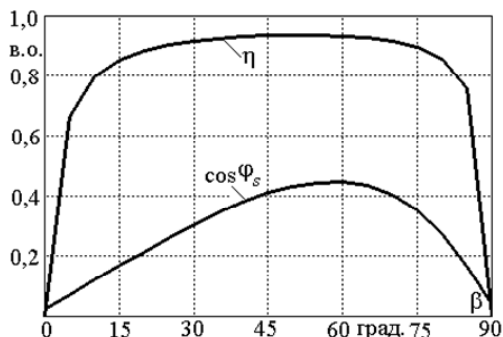


Рис. 10. Характеристики коэффициента мощности и КПД

Выводы.

1. Численно-полевой расчет позволяет достаточно точно учитывать геометрические формы сердечника статора ИМП, его нелинейные магнитные свойства и

анизотропию магнитных свойств рабочей камеры с продолговатыми ферромагнитными элементами.

2. Рассмотренные фазовые соотношения электромагнитных и силовых величин показывают, что по принципу действия в составе устройства по обработке разных веществ ИМП наиболее близок к синхронному реактивному двигателю.

3. Одним из ключевых элементов разработанных теории и методики расчетов электромагнитных параметров, их фазовых соотношений и характеристик ИМП является предложенный метод учета магнитной анизотропии его рабочей камеры с наполнением ферромагнитными элементами.

4. На участке устойчивой работы в энергетическом отношении ИМП характеризуется достаточно высоким КПД и весьма низким значением коэффициента мощности. Последнее связано с наличием в магнитной системе индуктора больших зазоров и маломагнитной среды в рабочей камеры.

5. Разработанная методика численно-полевых расчетов характеристик дает много полезной информации, которую можно использовать для проектирования и совершенствования ИМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. – К.: Техника, 1976. – 144 с.
2. Загирняк М.В., Бранспиз Ю.А., Шведчикова И.А. Магнитные сепараторы. Проблемы проектирования: Монография. – К.: Техника, 2011. – 224 с.
3. Компания GlobeCore / Аппарат Вихревого Слоя ABC-100. – Режим доступа: <https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html>. – Дата звертання: 30 вересня 2017.
4. Мілих В.І., Шилкова Л.В., Ревуженко С.А. Чисельний аналіз магнітного поля циліндричного трифазного індуктора магнітного сепаратора // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2017. – №1(1223). – С. 76-82.
5. Finite Element Method Magnetics: OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions/>. – Дата звертання: 15.06.2017.
6. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. Проектирование электрических машин. – М.: Юрайт, 2011. – 767 с.
7. Мілих В.І. Система автоматизованого формування розрахункових моделей електричних машин для програмного середовища FEMM // Технічна електродинаміка. – 2018. – №4. – С. 74-78. doi: 10.15407/techned2018.04.074.
8. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб.: Питер, 2010. – 356 с.
9. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – №2. – С. 40-46.
10. Милых В.И. Численно-полевой анализ адекватности проектных данных трехфазных асинхронных двигателей и метод их уточнения на этой основе // Технічна електродинаміка. – 2018. – №1. – С. 47-55. doi: 10.15407/techned2018.01.047.
11. Мілих В.І., Шилкова Л.В. Чисельно-польовий аналіз потужності магнітних втрат в трифазному індукторі магнітного поля // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – 2019. – №4(1329). – С. 99-106. doi: 10.20998/2409-9295.2019.4.15.

REFERENCES

1. Logvinenko D.D., Sheljakov O.P. *Intensifikacija tehnologicheskikh processov v apparatah s vihrevym sloem* [Intensification of technological processes in apparatus with a vortex layer]. Kiev, Tehnika Publ, 1976. 144 p. (Rus.)
2. Zagirnyak M.V., Branspiz Yu.A., Shvedchikova I.A. *Magnitnye separatory. Problemy proektirovaniya*. [Magnetic separators. Design issues]. Kiev, Tehnika Publ, 2011. 224 p. (Rus.)
3. *Kompanija GlobeCore. Apparat Vihrevogo Sloja AVS-100*. [Company GlobeCore. Vortex Layer Machine ABC-100]. Available at: <https://avs.globecore.ru/products/avs-100.html> (accessed 30.09.2017).
4. Milykh V.I., Shilkova L.V., Revuzhenko S.A. Numerical analysis of the magnetic field of a cylindrical three-phase magnetic separator inductor. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion»*, 2017, no.1(1123), pp. 76-82. (Ukr.)
5. *Finite Element Method Magnetics: OldVersions*. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. Available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions> (accessed 15.06.2017).
6. Kopylov I.P., Goryainov F.A., Klokov B.K. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [The design of electrical machines]. Moscow, Yurait Publ., 2011. 767 p. (Rus.)
7. Milykh V.I. The system of automated formation of electrical machines computational models for the FEMM software environment. *Technical Electrodynamics*, 2018, no.4, pp. 74-78. (Ukr.) doi: [10.15407/techned2018.04.074](https://doi.org/10.15407/techned2018.04.074).
8. Voldek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electrical machines. AC machines]. SPb, Piter Publ., 2010. 356 p. (Rus.)
9. Milykh V.I., Polyakova N.V. Determination of electromagnetic parameters of electric machines based on numerical calculations of magnetic field. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.2, pp. 40-46. (Rus.)
10. Milykh V.I. Numerically-field analysis of the adequacy of the design data of three-phase induction motors and the method of their refinement on this basis. *Technical Electrodynamics*, 2018, no.1, pp. 47-55. (Rus) doi: [10.15407/techned2018.01.047](https://doi.org/10.15407/techned2018.01.047).
11. Milykh V.I., Shilkova L.V. The numeral-field analysis of power of magnetic losses in the three-phase inductor of magnetic-field. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion»*, 2019, no.4(1329), pp. 99-106. (Ukr.) doi: [10.20998/2409-9295.2019.4.15](https://doi.org/10.20998/2409-9295.2019.4.15).

Поступила (received) 02.09.2019

Милых Владимир Иванович¹, д.т.н., проф.,
Шилкова Лариса Васильевна¹, аспирант,

¹ Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +380 057 7076514,
e-mail: mvikemkpi@gmail.com, larisa_lv@ukr.net

V.I. Milykh¹, L.V. Shilkova¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Numerical-field analysis of the characteristics of a three-phase magnetic field inductor for the treatment of various substances with current stabilization.

Introduction. A three-phase magnetic field inductor (MFI) similar to the asynchronous motor stator, which provides processing of various substances, is considered. This is done by means of oblong ferromagnetic elements moving with a rotating magnetic field and located in its cylindrical working chamber. **Problem.** The aim of the work is to develop the theory and conduct practical calculations of the parameters and characteristics of the MFI that connect the electromagnetic quantities and their phase relationships in the mode of its load. **Methodology.** The studies are carried out on the basis of numerical calculations of the magnetic field in the MFI taking into account the ferromagnetic elements in its working chamber. The calculation model of the chamber is represented by a homogeneous anisotropic magnetic medium for which the method of determining different magnetic permeabilities by its longitudinal and transverse axes is given. In order to obtain the characteristics of the presented MFI, the method of determining the electromagnetic parameters and phase relationships of the quantities accompanying its operation has been developed. **Results.** The theory and results of numerical-field analysis of electromagnetic quantities, their phase relationships and corresponding characteristics of three-phase MFI are presented. Calculations of characteristics are made for the inductor load mode depending on the phase shift of the magnetomotive force of the stator winding relative to the longitudinal axis of the chamber and while ensuring the constant value of the current of this winding. The characteristics include magnetic flux coupling, EMF and stator winding voltage, phase shifts between them and current, electromagnetic moment, input and output power, electrical and magnetic loss power, power factor and efficiency. **Practical value.** The technique of numerical-field calculations of electromagnetic quantities and their phase relationships is developed, and also the set of characteristics which should promote designing and perfection of inductors of the considered type is received. The presented technique is universal as it allows to display their cores practically of any shape. References 11, figures 10.

Key words: magnetic field inductor, asynchronous motor stator, theory, numerical-field calculations, electromagnetic quantities, phase relationships, characteristics.