

В.И. Милых, Л.В. Шилкова

ТОКОВЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНДУКТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Представлений метод визначення концентрації ферромагнітних елементів в робочій камері індуктора обертового магнітного поля, призначеного для технологічної обробки різних речовин. Метод полягає в контролі струму обмотки статора індуктора і не вимагає втручання в технологічний процес обробки. Надано теоретичне обґрунтування методу і проведена практична розрахункова оцінка його адекватності на прикладі конкретного індуктора. Теорія і практика методу засновані на чисельних розрахунках магнітного поля, електромагнітних параметрів і кутових характеристик індуктора. Практичне використання методу полягає у визначенні часу додаткового завантаження камери ферромагнітними елементами, які стираються в процесі роботи індуктора. Бібл. 10, рис. 8.

Ключові слова: індуктор магнітного поля, робоча камера, концентрація ферромагнітних елементів, контроль струму, чисельно-польовий аналіз, електромагнітні величини, кутові характеристики.

Представлен метод определения концентрации ферромагнитных элементов в рабочей камере индуктора вращающегося магнитного поля, предназначенного для технологической обработки различных веществ. Метод заключается в контроле тока обмотки статора индуктора и не требует вмешательства в технологический процесс обработки. Дано теоретическое обоснование метода и проведена практическая расчетная оценка его адекватности на примере конкретного индуктора. Теория и практика метода основаны на численных расчетах магнитного поля, электромагнитных параметров и угловых характеристик индуктора. Практическое использование метода заключается в определении времени дозагрузки камеры ферромагнитными элементами, которые истираются в процессе работы индуктора. Библ. 10, рис. 8.

Ключевые слова: индуктор магнитного поля, рабочая камера, концентрации ферромагнитных элементов, токковый контроль, численно-полевой анализ, электромагнитные величины, угловые характеристики.

Введение. В ряде производств получили распространение индукторы вращающегося магнитного поля (ИВМП) для технологической обработки разных веществ. Такие индукторы входят в состав различных перемешивателей, измельчителей и сепараторов [1-3].

Конструкция статора ИВМП подобна статору трехфазного асинхронного двигателя. Внутри него располагается цилиндрическая рабочая камера, через которую в аксиальном направлении пропускается обрабатываемое вещество. Для обработки служат ферромагнитные элементы (ФЭ) в виде отрезков железной проволоки. Они являются ферромагнитными и движутся с вращающимся полем, создавая в камере так называемый «вихревой слой» [1, 3]. Оболочка камеры выполняется из немагнитной стали и с магнитным полем не взаимодействует.

Магнитное поле в камере обеспечивает не только движение ФЭ, но и удерживает их на активной длине индуктора, которая примерно равна аксиальной длине ферромагнитного сердечника статора.

Для работы индуктора в рабочую камеру засыпается определенное количество ФЭ, зависящее от свойств обрабатываемого вещества и интенсивности режима обработки. По разным причинам, рассмотренным в [1], заполнение камеры элементами со временем уменьшается, и требуется периодическое их пополнение, что делается через специальный патрубок без выключения индуктора.

В данном случае рассматриваемый индуктор предназначен для аппарата с «вихревым слоем», обрабатывающего сточные воды, что описано в [1]. При этом износ ФЭ предопределен трением их концов об оболочку камеры, что приводит даже к появлению в оболочке сквозных кольцевых борозд. Есть и другие факторы износа, но по сравнению с этим они несуще-

ственны. Истирание концов ФЭ в фундаментальной работе [1] определили термином «износ длины».

Одной из проблем эксплуатации описанного аппарата является задача – когда и в каком количестве надо пополнить камеру новой порцией ФЭ.

Известным вариантом решения является установка на расточке сердечника статора измерительных катушек. В них вращающимся магнитным полем наводится ЭДС, которая при уменьшении концентрации ФЭ и, значит, изменении магнитных свойств среды в камере, должна изменяться. Благодаря этому, оператор или система управления получают информацию, способствующую решению указанной задачи.

Однако на практике описанный метод оказывается малочувствительным. И он не был достаточно обоснован расчетными тестами, ввиду серьезных допущений метода на основе теории магнитных цепей, использовавшегося для расчета магнитных полей.

Ситуация изменилась с разработкой методики расчета электромагнитных параметров и характеристик ИВМП на основе численных расчетов магнитных полей, что представлено в авторских работах [4, 5]. Благодаря этому выявилось, что можно прогнозировать изменение тока обмотки статора индуктора с изменением концентрации ФЭ в рабочей камере. Это подтвердилось в [6] при исследовании относительно небольшой экспериментальной модели индуктора.

Целью данной работы является теоретическое обоснование и расчетное подтверждение адекватности метода прогнозирования текущей концентрации ФЭ в рабочей камере ИВМП на основе наблюдения за током обмотки его статора. Это осуществляется на основе численных расчетов магнитного поля и электромагнитных параметров индуктора.

Объект исследования. Электромагнитная система ИВМП дана на рис. 1 ее поперечным сечением. Показаны используемые прямоугольная (x, y) и полярная системы координат (r, α).

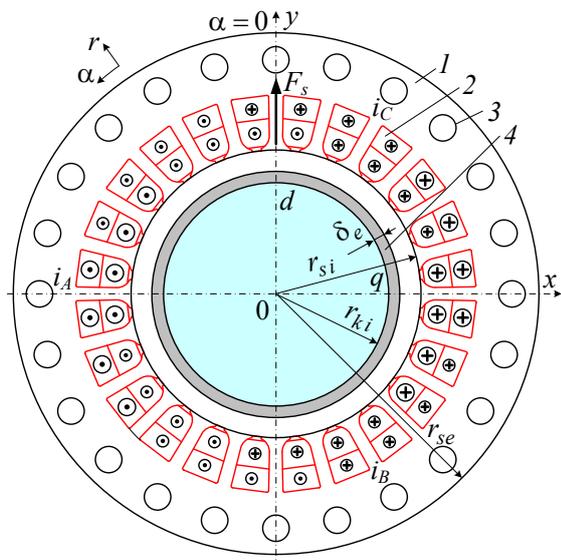


Рис. 1. Электромагнитная система ИВМП:
1 – шихтованный сердечник статора; 2 – трехфазная обмотка; 3 – вентиляционные каналы; 4 – оболочка рабочей камеры толщиной $\delta_e = 5$ мм

Индуктор является трехфазным двухполюсным. По технологическим соображениям заданы радиус внутренней поверхности камеры $r_{ki} = 0,047$ м и аксиальная длина сердечника статора $l_a = 0,25$ м. Рассчитаны радиусы расточки сердечника $r_{si} = 0,06$ м и на внешней его поверхности $r_{se} = 0,109$ м. Обмотка индуктора двухслойная с относительным укорочением 10/12, схема соединения – «звезда», на фазу приходится 72 витка. Сердечник выполнен из электротехнической стали марки 2212, толщина листов 0,5 мм, коэффициент заполнения $K_{Fe} = 0,95$.

Фрагмент идеализированной структуры с равномерным распределением ФЭ в рабочей камере представлен на рис. 2. Реальная структура элементов будет менее строгой [6], а идеализация, как и в [1, 4], необходима для доступной организации расчетов.

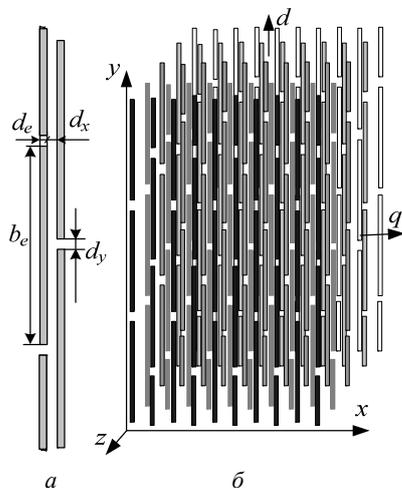


Рис. 2. Фрагмент идеализированной структуры ферромагнитных элементов

ФЭ выполняются из стали Ст3. Их размеры и зазоры взяты соответственно рис. 2,а: $d_e = 1$ мм; $b_e = 20$ мм; $d_x = 1,5$ мм; $d_y = 1$ мм. При этом коэффициент заполнения камеры ими в плоскости xy (рис. 2,б) $K_{Fes} = 0,322$. В плоскости yz принят такой же коэффициент, и тогда объемный коэффициент заполнения $K_{Fev} = K_{Fes}^2$ и получает значение 0,104.

В поперечном сечении ИВМП (рис. 1) магнитное поле считается плоскопараллельным. Поэтому круглые сечения ФЭ заменяются квадратными с соответствующими пересчетами размеров, как описано в [4].

Номинальное фазное напряжение обмотки статора U_{sN} составляет 100 В при частоте $f_s = 50$ Гц. В режиме идеального холостого хода (ХХ), т.е. при отсутствии ферромагнитных элементов в рабочей камере, среднее значение магнитной индукций B_{av} задано и составляет 0,12 Тл, что соответствует практически применяемым индукторам.

Основы численно-полевых расчетов. Источником вращающегося магнитного поля в индукторе является трехфазная симметричная система токов фазных обмоток статора (рис. 1):

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

где t – время; $I_m = \sqrt{2}I_s$ – амплитуда фазных токов; I_s – их действующее значение; $\omega_s = 2\pi f_s$ – угловая частота; β – начальная фаза токов, задающая необходимое для конкретного режима расчета угловое смещение направления МДС обмотки статора F_s от оси y .

На рис. 1 показаны направления токов в фазных обмотках в режиме идеального ХХ, при котором $\beta = 0$, и поэтому вектор МДС F_s направлен по оси y .

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

$$\text{rot}[\mu_a^{-1} \text{rot}(\vec{k} A_z)] = \vec{k} J_z, \quad (2)$$

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

Распространение магнитного поля ограничивается внешней поверхностью сердечника индуктора, где задано граничное условие Дирихле: $A_z = 0$.

Инструментом представляемых исследований являются численные расчеты магнитного поля методом конечных элементов по программе FEMM [7] с управлением ею созданным скриптом Lua, как в [8].

Причем, в отличие от работ [4, 5], здесь сам расчет поля проводится при непосредственном учете дискретной среды с ФЭ в рабочей камере, вместо ее замены эквивалентной сплошной средой. Этим исключаются допущения и дополнительные погрешности, связанные с такой заменой.

Допущение описания магнитного поля уравнением (2) обосновано расчетами в [9] и подтверждено экспериментально в [10], причем в данном индукторе соотношения аксиальной длины и диаметра расточки сердечника l_a/d_{si} в 2,3 и 3,2 раза больше, соответственно, что уменьшает возможную расчетную погрешность.

При расчете поля магнитная проницаемость μ_a в шихтованном стальном сердечнике и в ФЭ учитывается общеизвестным методом с учетом кривых намагничивания сталей. Коэффициенты заполнения сердечника K_{Fe} и рабочей камеры K_{Fes} по оси z задаются как исходные параметры для программы FEMM, и учитываются ее программными средствами.

Фазовые соотношения электромагнитных величин индуктора и суть угла β подробно рассмотрены в [4, 5]. Показано, что при работе индуктора под нагрузкой угол β находится в диапазоне $0 - 90^\circ$, а при крайних значениях электромагнитный момент (ЭММ) отсутствует. Это соответствует режиму рабочего ХХ [5], отличающегося от идеального ХХ наличием в камере ферромагнитных элементов.

На рис. 3 и рис. 4 показаны результаты расчета магнитного поля в режиме рабочего ХХ и в режиме номинальной нагрузки при указанных значениях тока статора I_s и угла β . На рис. 5 магнитное поле в рабочей камере показано для режима номинальной нагрузки в увеличенном масштабе.

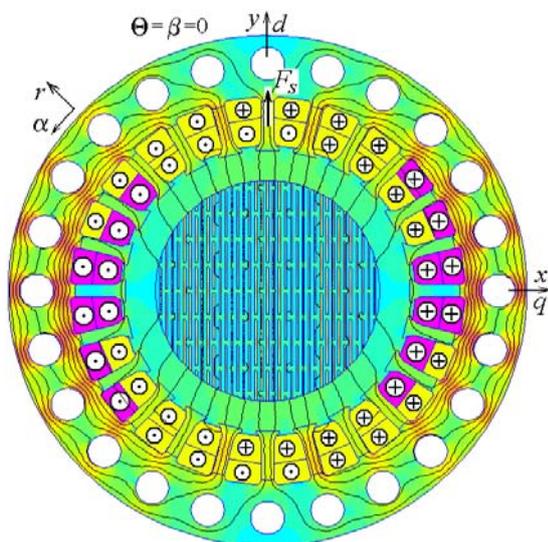


Рис. 3. Магнитное поле в индукторе в режиме рабочего холостого хода при $I_s=35$ А и $\beta=0$

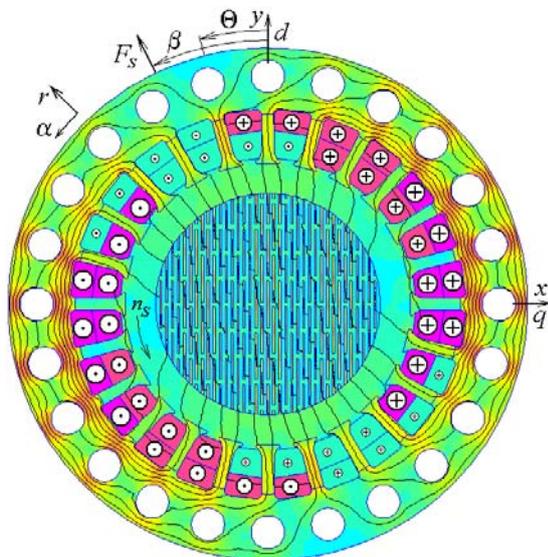


Рис. 4. Магнитное поле в индукторе в режиме номинальной нагрузки при $I_s=36$ А и $\beta=26,7^\circ$

На рис. 4 и рис. 5 видно отклонение силовых линий поля от продольных осей ФЭ. Это является условием возникновения ЭММ, действующего на всю массу ФЭ и приводящего их в движение. Природа этого момента соответствует теории тензора магнитного натяжения Максвелла, что поясняется в [5].

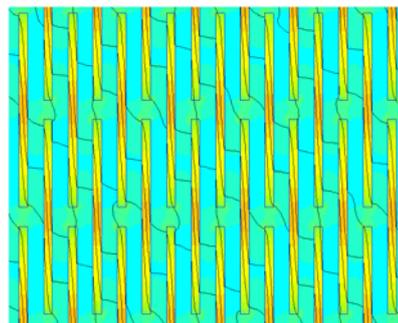


Рис. 5. Фрагмент картины магнитного поля в рабочей камере индуктора в режиме номинальной нагрузки

По сути, ЭММ в рассматриваемом индукторе является реактивным, и его принцип действия соответствует синхронному реактивному двигателю, что обосновано в [4, 5]. Поэтому в рабочей камере по направлению ориентации ФЭ назначена продольная ось d , а перпендикулярно ей – поперечная ось q (рис. 1). В установившемся рабочем режиме оси вращаются вместе с этими элементами и полем с частотой n_s .

Электромагнитные величины в ИВМП определяются на основе методики, изложенной в [5], и для данной работы из нее востребованными являются следующие положения.

По результатам расчета магнитного поля программными средствами FEMM [7] через тензор магнитного натяжения Максвелла получается ЭММ:

$$M_{em} = \frac{l_a}{\mu_0(r_{si} - r_{ki}) S_\delta} \int_{S_\delta} B_r B_\alpha r dS, \quad (3)$$

где B_r и B_α – радиальная и угловая составляющие магнитной индукции; S_δ – площадь сечения зазора, ограниченная окружностями с радиусами r_{ki} и r_{si} со сторон камеры и статора; μ_0 – магнитная постоянная.

По распределению ВМП формируется временная функция первой гармоники магнитного потокоцепления фазной обмотки статора:

$$\Psi_a = \Psi_m \cos(\omega_s t + \gamma_{\Psi a}). \quad (4)$$

В соответствии с законом электромагнитной индукции из (4) получается ЭДС этой обмотки:

$$e_a = \omega \Psi_m \cos(\omega_s t + \gamma_{\Psi a} - \pi/2), \quad (5)$$

откуда ее действующее значение и начальная фаза:

$$E_a = \sqrt{2} \pi f_s \Psi_m; \quad \gamma_{Ea} = \gamma_{\Psi a} - \pi/2. \quad (6)$$

Равновесие напряжений в фазной обмотке статора представлено комплексным уравнением [4]:

$$\underline{U}_s = -\underline{E}_a + jX_v \underline{I}_s + (R_s + R_{mag}) \underline{I}_s, \quad (7)$$

где на основе (1) и (6) фигурируют комплексы ее тока $\underline{I}_s = I_s e^{j\beta}$ и ЭДС $\underline{E}_a = E_a e^{j\gamma_{Ea}}$.

В формулу (7) входят активное сопротивление R_s обмотки статора и реактивное сопротивление ее лобового рассеяния X_v , которые вычисляются, как и в асинхронных двигателях: $R_s = 0,31$ Ом и $X_v = 0,39$ Ом.

Активное сопротивление R_{mag} отображает мощность магнитных потерь и определяется в процессе итерационного расчета магнитного поля.

По напряжению (7) в показательной форме $\underline{U}_s = U_s e^{j\omega t}$ находится его действующее значение U_s и фазовый сдвиг относительно тока $\varphi_s = \gamma_{U_s} - \beta$.

После расчета магнитного поля и электромагнитных параметров в рассмотренном режиме нагрузки ИВМП при $U_s = U_{sN}$ и указанных на рис. 4 значениях I_s и β получено: $R_{mag} = 0,01207$ Ом; $\Psi_m = 0,376$ Вб; $\gamma_{\Psi_a} = 15,08^\circ$; $E_a = 83,6$ В; $\varphi_s = 73,5^\circ$.

В [4, 5] выявлено, что при задании $\beta = 0$, значение γ_{Ψ_a} получилось таким же, и это соответствовало режиму рабочего XX, так как и ЭММ был равен нулю. Угол поворота вектора магнитного потокоцепления $\underline{\Psi}_a$ от режима XX в режим нагрузки, согласно теории синхронных машин, это угол нагрузки Θ . Поэтому угол γ_{Ψ_a} в (4) – это угол нагрузки ИВМП, т.е. $\Theta = \gamma_{\Psi_a}$. Взаимосвязи углов β и Θ друг с другом, а также с моментом нагрузки и другими электромагнитными параметрами индуктора подробно представлены в [4, 5].

Определение токового фактора заполнения рабочей камеры ферромагнитными элементами.

Как показатель заполнения рабочей камеры предлагается использовать силу тока обмотки статора, а конкретнее – изменение тока фазной обмотки. Для выявления такой возможности проделана серия соответствующих расчетов магнитного поля и электромагнитных параметров индуктора по изложенной выше методике с формулами (3)-(7).

Процесс износа ферромагнитных элементов в данной работе имитируется в простейшем варианте изменением их длины, которая уже обозначена как b_e , и при этом число ФЭ элементов в камере считается неизменным.

Ранее уже представлены результаты расчетов при базовом значении длины b_e , равном 20 мм, и избранных значениях угла β с соответствующим током I_s . Теперь к этому значению b_e добавим еще четыре значения длины ФЭ при ее уменьшении с шагом 2 мм. И расчеты проведем уже при ряде значений β с целью получения угловых характеристик индуктора. При этом, естественно, зазоры d_z между элементами соответственно возрастают, а диаметр элементов d_e и зазоры d_x между ними сохраняются.

На рис. 6 показаны модели модернизированного заполнения рабочей камеры (симметричные четверти поперечного сечения) с соответствующими картинками магнитных полей. Для базового варианта заполнения аналогичное полное изображение дано на рис. 4 и в виде фрагмента – на рис. 5.

При принятых модификациях ФЭ коэффициент заполнения рабочей камеры в поперечном сечении K_{Fes} изменяется, а вот коэффициент заполнения в продольном сечении K_{FesZ} сохраняется, как в базовом варианте – K_{Fesb} . Тогда объемный коэффициент заполнения камеры определяется как $K_{Fev} = K_{Fes} \cdot K_{Fesb}$.

Исходные параметры пяти расчетных вариантов, а именно: b_e , K_{Fes} и K_{Fev} , приведены в табл. 1.

При заданном напряжении обмотки статора для пяти определенных вариантов заполнения рабочей

камеры рассчитаны, как в [5], семейства двух необходимых в данном случае угловых характеристик индуктора: $I_s(\Theta)$ и $M_{em}(\Theta)$ – они изображены на рис. 7.

Методика расчета характеристик заключалась в следующем.

В качестве варьируемой величины принята входящая в (1) обобщенная начальная фаза токов β , которая зависит от уровня нагрузки индуктора [4, 5].

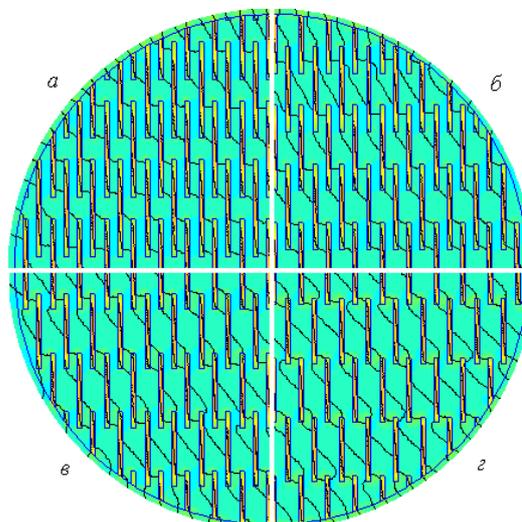


Рис. 6. Варианты заполнения рабочей камеры с изменением длины ферромагнитных элементов: а – $b_e = 18$ мм; б – $b_e = 16$ мм; в – $b_e = 14$ мм; з – $b_e = 12$ мм

Таблица 1
Зависимости параметров индуктора от длины ферромагнитных элементов

Вариант	b_e , мм	K_{Fes}	K_{Fev}	I_s , А		E_a , В
				$M_{em0}=0$	M_{emN}	
1	20	0,322	0,104	35,0	36,0	83,6
2	18	0,290	0,094	38,4	39,4	82,6
3	16	0,256	0,082	41,1	42,1	81,1
4	14	0,226	0,073	43,5	44,1	80,1
5	12	0,193	0,062	45,8	46,5	79,1

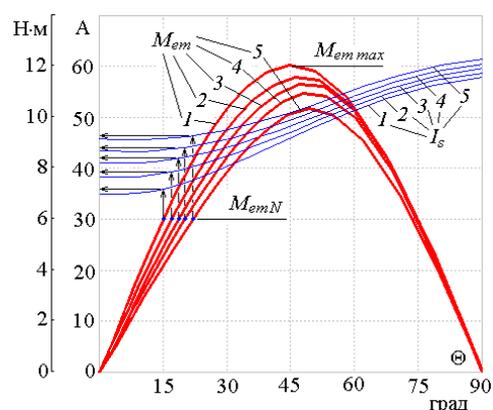


Рис. 7. Построения на угловых характеристиках тока I_s и ЭММ M_{em} для получения зависимости $I_s(b_e)$ при номинальном ЭММ M_{emN}

При неизменном напряжении U_s для каждого значения угла β решается обратная задача расчета магнитного поля с получением в итоге необходимого значения тока I_s . Это решение, как показано в [5], дос-

тигается методом последовательных приближений с решением на каждой итерации прямой задачи – расчетом магнитного поля при заданном значении угла β и подбираемом значении тока I_s , и, значит, известном распределении токов в обмотках по (1).

При конкретном значении угла β задается начальное приближение тока I_s и рассчитывается магнитное поле, и в итоге по (7) получается значение напряжения U_s . Оно сравнивается с заданным значением U_{sN} , и в зависимости от результата корректируется значение тока I_s . Итерации продолжаются до совпадения U_s и U_{sN} с желаемой точностью, что описано в [5].

Характеристики индуктора рассчитывались в диапазоне угла β от 0 до 90° прохождением его с шагом 5°. При каждом значении β определялись соответствующие значения тока I_s , ЭММ M_{em} , ЭДС E_a и угол нагрузки Θ , который далее принимается как аргумент для характеристик $I_s(\Theta)$ и $M_{em}(\Theta)$.

Для выявления зависимости $I_s(b_e)$ при номинальном электромагнитном моменте M_{emN} проведены построения, показанные на рис. 7. Значение M_{emN} составляло 6 Н·м, и оно принято равным половине максимального момента M_{emmax} при базовой длине ферромагнитных элементов $b_e=20$ мм.

Полученные результаты – значения тока I_s при M_{emN} и при принятых значениях b_e сведены в табл. 1. Здесь же приведены значения тока I_s при нулевом значении момента M_{emo} , что соответствует описанному ранее режиму рабочего XX при $\beta = 0$.

Имеющиеся теперь по данным табл. 1 две зависимости $I_s(b_e)$ при M_{emN} и M_{emo} представлены графически на рис. 8. Очевидно, что все остальные допустимые режимы работы будут находиться в пределах между получившимися двумя графиками.

Здесь же по данным табл. 1 построены графики зависимостей плоскостного K_{Fes} и объемного K_{Fev} коэффициентов заполнения рабочей камеры.

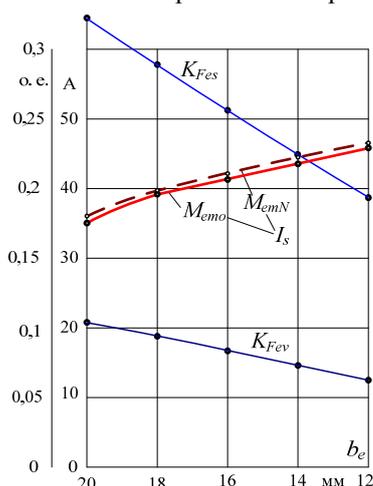


Рис. 8. Зависимости коэффициентов заполнения рабочей камеры K_{Fes} и K_{Fev} и тока обмотки статора I_s от длины ФЭ b_e

Теперь по табл. 1 и рис. 8 видно, что в рассмотренном диапазоне изменения длины ферромагнитных элементов ток обмотки статора автоматически изменится на достаточно заметное значение – порядка 10 А. Это легко фиксировать непрерывно по амперметру или специальному датчику тока.

Таким образом, оператор, управляющий индуктором, или автоматическая система управления могут определить текущее значение коэффициента заполнения рабочей камеры ферромагнитными элементами и, значит, момент времени, когда необходимо пополнить ее новыми элементами.

Еще в табл. 1 добавлен столбец ЭДС фазной обмотки статора E_a (6). В рассмотренном диапазоне изменения длины ферромагнитных элементов эта ЭДС изменилась на 5,4 %. В той же мере будет изменяться ЭДС и любых измерительных витков, которые применяются для индикации заполнения рабочей камеры индуктора ферромагнитными элементами.

А вот фазный ток в то же время изменился на 29,2 % – поэтому именно он является более наглядным и чувствительным показателем концентрации ферромагнитных элементов в рабочей камере, то есть показателем объемного коэффициента заполнения рабочей камеры K_{Fev} , который в табл. 1 изменился на 40 %.

Качественным подтверждением полученных результатов являются данные экспериментов на упрощенной модели индуктора [6]. В условиях проведенных там исследований выявлено, что уменьшение объемного коэффициента заполнения камеры от 0,037 до 0 привело к увеличению тока статора на 13,4 %. Меньшее изменение по сравнению с рассматриваемым в статье ИВМП объясняется существенно меньшими значениями коэффициента заполнения k_{Fev} .

Выводы.

1. Разработанный на основе численно-полевых расчетов магнитных полей токовый метод позволяет связать концентрацию ферромагнитных элементов в рабочей камере индуктора вращающегося магнитного поля и ток в его обмотке.

2. Практические расчеты на конкретном образце индуктора показали, что износ длины ферромагнитных элементов вследствие их истирания на 40 % приводит к автоматическому увеличению фазного тока на 29,2 %. В тоже время, применяемый альтернативный метод контроля посредством измерительных витков требует усложнения конструкции индуктора и дает уменьшение ЭДС лишь на 5,4 %, то есть обладает значительно меньшей чувствительностью.

3. Наблюдение за током обмотки индуктора позволяет контролировать заполнение его рабочей камеры ферромагнитными элементами, не прерывая процесса эксплуатации ИВМП. Это дает возможность своевременно пополнять камеру такими элементами и, тем самым, поддерживать на заданном уровне технологическую обработку различных веществ, пропускаемых через эту камеру.

4. Несмотря на то, что исследования проведены при конкретном варианте износа ФЭ (износ длины), предложенный метод токового контроля заполнения ими рабочей камеры может быть применен и при других вариантах износа. Например, при утончении ФЭ, при комбинации уменьшения длины и толщины ФЭ, либо просто при выносе ФЭ из рабочей камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. – К.: Техника, 1976. – 144 с.

2. Belounis A., Mehasni R., Ouil M., Feliachi M., El-Hadi Latreche M. Design with optimization of a magnetic separator for turbulent flowing liquid purifying applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, vol. 51, no. 8, pp. 1-8. doi: **10.1109/TMAG.2015.2424401**.
3. Герасимов М.Д., Локтионов И.О. Технологические решения двойного назначения. Перспективы применения. *Вектор ГеоНаук*, 2019, Т. 2, № 1, С. 19-26. doi: **10.24411/2619-0761-2019-10003**.
4. Мильх В.И., Шилкова Л.В. Численно-полевой анализ характеристик трехфазного индуктора магнитного поля для обработки различных веществ при стабилизации его тока. *Електротехніка і електромеханіка*, 2019, № 6, С. 21-28. doi: **10.20998/2074-272X.2019.6.03**.
5. Мильх В.И., Шилкова Л.В. Характеристики цилиндрического индуктора вращающегося магнитного поля технологического назначения при его питании от сети с заданным напряжением. *Електротехніка і електромеханіка*, 2020, № 2, С. 13-19. doi: **10.20998/2074-272X.2020.2.02**.
6. Міліх В.І., Шилкова Л.В. Експериментальне дослідження фізичної моделі трифазного індуктора магнітного поля в робочому режимі при обробці сипучого матеріалу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії», 2020, № 3(1357), С. 3-7. doi: **10.20998/2409-9295.2020.3.01**.
7. Finite Element Method Magnetics: OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. – Режим доступу: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions/>. – Дата звертання: 15.06.2017.
8. Міліх 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**.
9. Міліх В.І., Шилкова Л.В., Ревуженко С.А. Чисельний аналіз магнітного поля циліндричного трифазного індуктора магнітного сепаратора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії», 2017, № 1(1223), С. 76-82.
10. Міліх В. І., Шилкова Л.В. Чисельно-експериментальний аналіз магнітного поля індуктора магнітного сепаратора на базі асинхронного двигуна. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії», 2018, №5(1281), С. 104-109.

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. Belounis A., Mehasni R., Ouil M., Feliachi M., El-Hadi Latreche M. Design with optimization of a magnetic separator for turbulent flowing liquid purifying applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, vol. 51, no. 8, pp. 1-8. doi: **10.1109/TMAG.2015.2424401**.
3. Gerasimov M.D., Loktionov I.O. Dual-use technological solutions. Application prospects. *Vector of Geosciences*, 2019, vol. 2, no. 1, pp. 19-26. (Rus). doi: **10.24411/2619-0761-2019-10003**.
4. Milykh V.I., Shilkova L.V. Numerical-field analysis of the characteristics of a three-phase magnetic field inductor for the treatment of various substances with current stabilization. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no. 6, pp. 21-28. doi: **10.20998/2074-272X.2019.6.03**.
5. Milykh V.I., Shilkova L.V. Characteristics of a cylindrical inductor of a rotating magnetic field for technological purposes when it is powered from the mains at a given voltage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2020, no.2, pp. 13-19. doi: **10.20998/2074-272X.2020.2.02**.

6. Milykh V.I., Shilkova L.V. Experimental research of the three-phase physical model of the magnetic field inductor in the working mode when processing bulk material. *Bulletin of NTU «KhPI»*. Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion», 2020, no.3(1357), pp. 3-7. (Ukr). doi: **10.20998/2409-9295.2020.3.01**.
7. *Finite Element Method Magnetics: OldVersions*. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable. Available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions> (accessed 15.06.2017).
8. 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**.
9. 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(1223), pp. 76-82. (Ukr).
10. Milykh V.I., Shilkova L.V. Numerical-experimental analysis of the magnetic field of a magnetic separator inductor on the basis of an asynchronous motor. *Bulletin of NTU «KhPI»*. Series: «Electric machines and electromechanical energy conversion», 2018, no. 5(1281), pp. 104-109. (Ukr).

Поступила (received) 16.07.2020

Мильх Владимир Иванович¹, д.т.н., проф.,
Шилкова Лариса Васильевна¹, ст. преподаватель,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +380 57 7076514,
e-mail: mvikemkpi@gmail.com, larisa_lv@ukr.net

V.I. Milykh¹, L.V. Shilkova¹

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

Control current method of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the technological inductor of magnetic field during its operation.

Introduction. A rotating magnetic field three-phase inductor designed for the technological processing of various substances is considered. The processing is carried out by ferromagnetic elements in the form of pieces of iron wire moving with a magnetic field. **Problem.** The control problem of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the inductor is solved. This is necessary in order to replenish the chamber in time with elements that wear out but without interrupting the processing. **Methodology.** The proposed control method consists in observing the current of the inductor stator winding, which is carried out during its operation and does not require intervention in the technological process of processing. **Results.** The theoretical substantiation of the method is given and a practical calculation evaluation of its adequacy is made on the example of a specific inductor. The theory and practice of the method are based on numerical calculations of the magnetic field, electromagnetic parameters and the angular characteristics of the inductor. **Practical value.** The practical use of the method is to automatically determine the time of reloading the chamber with ferromagnetic elements that are worn out during the inductor operation. This increases the performance of the inductor and eliminates its downtime. References 10, figures 8.

Key words: magnetic field inductor, working chamber, concentration of ferromagnetic elements, current control, numerical field analysis, electromagnetic parameters, angular characteristics.