

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 531.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ СТУПЕНЧАТОГО ИНДУКЦИОННОГО ЛЕВИТАТОРА

*Пириева Н.М.**Доктор философии по технике, ассистент
Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности
г.Баку*

DETERMINATION AND STUDY OF THE MAIN DIMENSIONS OF A STEP INDUCTION LEVITATOR

*Pirieva N.M.**PhD in Engineering, Assistant
Azerbaijan State University of Oil and Industry
Baku city**DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.5.95.1627*

АННОТАЦИЯ

В статье разработан аналитический метод на основе формул удельной магнитной проводимости рабочего воздушного зазора и ступенчатого воздушного зазора для определения основных размеров ступенчатого индукционного левитатора. Полученные аналитические выражения могут быть использованы для решения задач проектирования управляемой индукционной опоры, стабилизатора переменного тока, устройства слежения и другого электротехнического оборудования на основе ступенчатой индукционной левитации.

ABSTRACT

The article developed an analytical method based on the formulas for the specific magnetic conductivity of the working air gap and the stepped air gap to determine the main dimensions of the stepped induction levitator. The obtained analytical expressions can be used to solve the problems of designing a controlled induction support, an AC stabilizer, a tracking device and other electrical equipment based on stepped induction levitation.

Ключевые слова: ступенчатый магнитопровод, обмотка возбуждения, безразмерные величины, индукционный левитатор, левитационная обмотка

Keywords: stepped magnetic circuit, excitation winding, dimensionless quantities, induction levitator, levitation winding

Электрические аппараты с индукционными левитационными элементами (ЭА с ЛЭ) совмещают в себе функции измерения, управления и стабилизации электрических и неэлектрических величин. Они относятся к слаботочным электрическим аппаратам и имеют простые конструкции, высокую стабильность и точность рабочих характеристик. Основы теории, расчета и применения ЭА с ЛЭ, имеющих различные функциональные назначения остается открытым. Каждая разновидность аппарата не только должны отвечать требованиям заданий на проектирование, но должны быть оптимальными в функциональном отношении и в отношении затрат. А это требует систематизации конструктивных схем и функциональных зависимостей основных параметров существующих разновидностей ЭА с ЛЭ. В статье принято во внимание, что габаритные размеры ЭА с ЛЭ в основном определяются размерами магнитной системы и ограничения на эти размеры должны учитывать тепловую стойкость ЛЭ.

К настоящему времени разработаны электрические аппараты с индукционными левитационными элементами (ЭА с ЛЭ) различных назначений: стабилизаторы переменного тока, датчики силы и

давления, устройства для определения короткозамкнутых витков в обмотках тороидальных трансформаторов и дросселей, устройство для стабилизации натяжения длинномерного материала, коммутационный аппарат переменного тока, устройство для измерения толщины движущихся материалов, управляемый исполнительный механизм для свето-лучевой пайки, натяжное устройство для катушки катушек и т.д.

Стабилизаторы переменного тока, устройства слежения, управляемые опоры и другое электротехническое оборудование построены на основе ступенчатой индукционной левитации (рис. 1) [1,2,3].

Индукционный левитатор, имеющий простую конструкцию, состоит из магнитопровода 1, обмотки возбуждения (ОВ) 2 и левитационной обмотки (ЛО) 3.

Обмотка возбуждения (ОВ) подключается к источнику переменного напряжения U_1 (может быть односекционным или многосекционным), а обмотка левитации замыкается накоротко. При изменении в диапазоне $U_1 = U_{\max} - U_{\min}$ он перемещается по ядру и меняет свое положение на $X_{\max} - X_{\min} = X_i$.

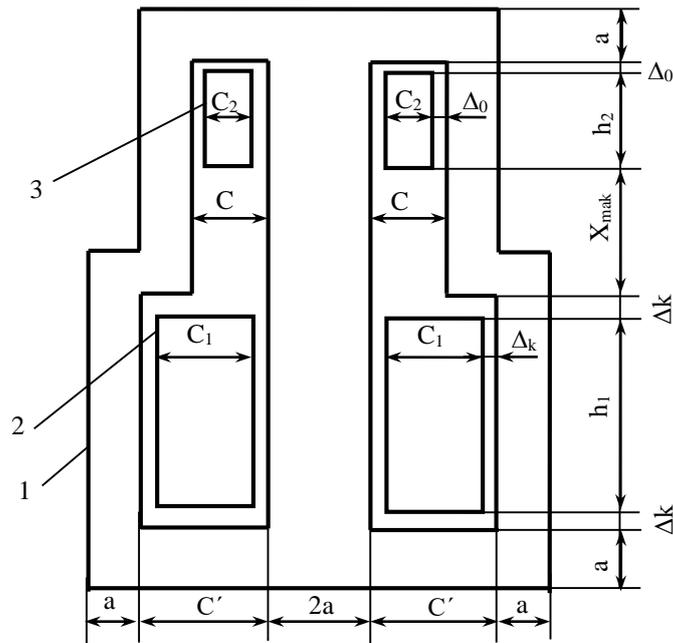


Рис. 1. Принципиальная схема простого ступенчатого индукционного левитатора

Рабочий ток обмотка левитации X_i прямо пропорционален диапазону изменения напряжения

$$\Delta U = U_{\text{mak}} - U_{\text{min}}.$$

Задается расчетное задание индукционного левитатора: значения напряжения U_{mak} , U_{min} и $U_{\text{ном}}$, рабочий ход X_i , температуры подъем обмоток τ_1 и τ_2 , частота токов ω . Основная цель расчетов – найти габариты ИЛ. Однако решение этой задачи довольно сложное, поэтому необходимо выполнить ряд условий:

Магнитное поле c в рабочем воздушном зазоре должно быть однородным, отношения размеров $m_a = b/a$ и $m_c = b/c$ не должны выходить за определенные пределы [1,2].

Размеры ОВ и ОЛ (h_1 , c_1 , h_2 и c_2) должны обеспечивать их допустимое повышения температуры.

ОЛ размещенный в рабочем воздушном зазоре должен иметь электромеханические и тепловые сопротивления. Для этого, воздушные зазоры между ОЛ и стержнями сердечника Δ_0 должны быть очень малы, а значение безразмерной величины $n_{e2} = h_2/c_2$ не должно превышать требуемого предела.

Размах колебаний напряжения на концах обмоток возбуждения $\Delta U = U_{\text{mak}} - U_{\text{min}}$ должен обеспечивать рабочего тока ОЛ $X_i = X_{\text{mak}} - X_{\text{min}}$ и соответствовать линейному участку кривой намагничивания.

Габаритные размеры индукционного левитатора должны удовлетворять требованиям принципа соответствия, должно выполняться ограничение на один из этих размеров.

Из исследований, проведенных в этом направлении, известно [4]:

1. Для получения однородного магнитного поля коэффициенты необходимо брать в пределах

$$m_a = b/a = 2 \div 6$$

$$m_c = b/c = 2 \div 6.$$

При малых значениях этих коэффициентов увеличивается рассеяние магнитных потоков и уменьшается сопротивление ОЛ.

2. Для уменьшения высоты ИЛ сердечник должен быть ступенчатым, а отношение $n_{e1} = h_1/c_1$ должно быть как можно меньше. Повышение температуры τ_1 зависит от безразмерной величины n_{e1} .

3. При уменьшении величины $n_{e2} = h_2/c_2$ для обмотки левитации, высота H индукционного левитатора уменьшается, но прирост температуры τ_2 обмотка левитации увеличивается.

Для учета этих свойств необходимо исследовать математическую зависимость между толщиной рабочего воздушного зазора (c) и удельной магнитной проницаемостью (λ) и удельной магнитной проницаемостью λ_s воздушного зазора (c'), где находится обмотка возбуждения.

Определение удельной магнитной проводимости

Удельная магнитная проводимость воздушных зазоров λ зависит от размеров ядра a , b и c [1].

$$\lambda = 2\mu_0 m_c \left[1 + \frac{2,92}{m_c} \lg \left(1 + \frac{\pi}{m_a} \right) \right] = 2\mu_0 m_c \sigma_b; \quad (1)$$

$$\lambda_s = 2\mu_0 m'_c \left[1 + \frac{2,92}{m'_c} \lg \left(1 + \frac{\pi}{m'_a} \right) \right] = 2\mu_0 m'_c \cdot \sigma'_b; \quad (2)$$

где

$$m_a = \frac{b}{a}; m_c = \frac{b}{c}; m'_c = \frac{b}{c'};$$

$$\frac{m_c}{m'_c} = \frac{c'}{c} > 14;$$

$$\sigma_b = 1 + \frac{2,92}{m_c} \lg \left(1 + \frac{\pi}{m_a} \right);$$

$$\sigma'_b = 1 + \frac{2,92}{m'_c} \lg \left(1 + \frac{\pi}{m_a} \right);$$

В таблице 1 приведены значения, рассчитанные для λ и σ_b по формуле (1).
Учитываем $c_1 > c_2$, то

$$c' = c_1 + 2\Delta_k; c = c_2 + 2\Delta_0;$$

$$\Delta_k \approx \Delta_0 \approx 0,1 \text{ мм}$$

Ступенчатое ядро характеризуем коэффициентами n_λ и n_c .

$$n_\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_c} = \frac{m_c}{m'_c} \cdot \frac{\sigma_b}{\sigma'_b} = n_c \cdot \frac{\sigma_b}{\sigma'_b}; \quad (3)$$

$$n_c = \frac{m_c}{m'_c} = \frac{c'}{c}; m_c > m'_c; \quad (4)$$

Учитывая $m_a=2$ и $m_c=5$, то из таблицы 1 находим $\lambda=15,566 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Если мы возьмем $m'_c < m_c$, приняв $m_a=2$ и $m_c=4$, то найдем из этой таблицы $\lambda_s=13,055 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Таким образом, мы получаем для коэффициентов n_c и n_λ .

$$n_c = \frac{m_c}{m'_c} = \frac{5}{4} = 1,25;$$

$$n_\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_s} = \frac{15,566}{13,055} = 1,192$$

В таблице 2 приведены значения коэффициента n_λ для различных значений n_c .

По значениям безразмерных коэффициентов n_λ и n_c находят размерности ИЛ.

Аналитическая зависимость между размерами сердечника и рабочим зазором

Одним из условий формирования однородного магнитного поля является максимальное уменьшение толщины воздушного зазора [5,6]. Это приводит к уменьшению толщины c_2 ОВ и увеличению высоты h_2 . Определить зависимость размеров стержней сердечника (a и b) и площади поперечного сечения S_c от рабочего диапазона воздуха c :

$$S_c = 2ab = 2c^2 \frac{m_c^2}{m_a} = k_3 c^2 \quad (5)$$

$$\frac{m_a}{m_c} = \frac{c}{a}; a = c \frac{m_c}{m_a} = k_a c;$$

$$b = m_c c \quad (6)$$

Принимаем

$$k_3 = 2 \frac{m_c^2}{m_a}; k_a = \frac{m_c}{m_a}.$$

В таблице 3 приведены значения коэффициентов k_3 и k_a .

Для определения зависимостей λ от конкретного магнитопровода измерений возьмем четыре характерных значения λ , приведенных в табл. 1, и получим соответствующие аналитические выражения.

Таблицы 1

Значения удельной магнитной проницаемости рабочего воздушного зазора $\lambda \cdot 10^{-6}$ Гн/м и коэффициента рассеяния σ_b

$\frac{m_a}{m_c}$	2	3	4	5	6	$\frac{\sigma_b}{\lambda}$	$\lambda_0 \cdot 10^{-6}$	Примечания
2	1.598	1.454	1.367	1.309	1.267	σ_b	5.024	$\lambda = \lambda_0 + \lambda_b$ $\lambda_0 = 2\mu_0 M_b$ $\lambda_b = 2\mu_0 A_0$ $A_0 = 2,92 \lg \left(1 + \frac{\pi}{m_a} \right)$ $\sigma_b = \frac{\lambda}{\lambda_0}$
	8.030	7.305	6.870	6.576	6.365	λ		
3	1.399	1.303	1.245	1.206	1.178	σ_b	7.536	
	10.543	9.817	9.382	9.090	8.877	λ		
4	1.299	1.227	1.184	1.155	1.133	σ_b	10.048	
	13.055	12.329	11.893	11.600	11.388	λ		
5	1.239	1.182	1.147	1.124	1.107	σ_b	12.56	
	15.566	14.841	14.406	14.112	13.901	λ		
6	1.2	1.151	1.122	1.103	1.089	σ_b	15.072	
	18.078	17.353	16.917	16.624	16.413	λ		

Таблица 2

Значения безразмерных коэффициентов n_c и n_λ

$\frac{m_c}{m'_c}$	n_c	$m_a = 2$		$m_a = 3$		$m_a = 4$		$m_a = 5$		$m_a = 6$	
		n_λ	σ'_B/σ_B								
6/5	1,20	1,161	1,142	1,767	1,132	1,174	1,022	1,178	1,019	1,181	1,016
5/4	1,25	1,192	1,048	1,204	1,038	1,211	1,032	1,216	1,027	1,220	1,023
4/3	1,333	1,238	1,077	1,255	1,062	1,267	1,052	1,276	1,044	1,283	1,038
3/2	1,5	1,319	1,142	1,344	1,115	1,365	1,098	1,382	1,085	1,395	1,075
6/4	1,5	1,384	1,082	1,407	1,066	1,422	1,055	1,433	1,047	1,441	1,040
5/3	1,666	1,476	1,129	1,511	1,102	1,535	1,085	1,552	1,073	1,566	1,064
4/2	2	1,687	1,230	1,687	1,185	1,731	1,154	1,764	1,133	1,789	1,118
6/3	2	1,714	1,166	1,767	1,132	1,803	1,110	1,829	1,093	1,849	1,082
5/2	2,5	1,938	1,291	2,031	1,230	2,097	1,192	2,146	1,164	2,184	1,144

Таблица 3

Значения коэффициентов k_3 и k_a

$\frac{m_a}{m_c}$	2	3	4	5	6	k_3/k_a
2	4	$2\frac{2}{3}$	2	$1\frac{3}{5}$	$1\frac{1}{3}$	k_3
	1	1,5	0,5	$\frac{2}{5}$	$\frac{1}{3}$	k_a
3	9	6	4,5	$3\frac{3}{5}$	3	k_3
	1,5	1	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{5}$	0,5	k_a
4	16	$10\frac{2}{3}$	8	$6\frac{2}{5}$	$5\frac{1}{3}$	k_3
	2	$1\frac{1}{3}$	1	0,8	$\frac{2}{3}$	k_a
5	25	$16\frac{2}{3}$	12,5	10	$8\frac{1}{3}$	k_3
	2,5	$1\frac{2}{3}$	1,25	1	$\frac{5}{6}$	k_a
6	36	24	18	$14\frac{2}{5}$	12	k_3
	3	2	1,5	$1\frac{1}{5}$	1	k_a

Вариант 1. Для $m_a = m_c = 2$; $\lambda = 8,03 \cdot 10^{-6}$ Гн/м найдем:

$$k_3 = \frac{2m_c^2}{m_a} = 2\frac{2^2}{2} = 4;$$

$$S_c = k_3 c^2 = 4c^2; k_a = \frac{m_c}{m_a} = \frac{2}{2} = 1; a = k_a c = c; b = m_c c = 2c$$

Вариант 2.

$$m_a = 6; m_c = 2; \lambda = 6,31 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

$$k_3 = \frac{4}{3}; S_c = \frac{4}{3}c^2; k_a = \frac{1}{3};$$

$$a = c; b = 6c$$

$$a = \frac{c}{3}; b = 2c$$

Вариант 3.

$$m_a = 2; m_c = 6; \lambda = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

$$k_3 = 36; S_c = 36c^2; k_a = 3;$$

$$a = 3c; b = 6c$$

Вариант 4.

$$m_a = 6; m_c = 6; \lambda = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

$$k_3 = 12; S_c = 12c^2; k_a = 1;$$

Результаты занесены в таблицу 4, и в этой таблице приведены сравнительные схемы воздушного пространства. При больших значениях воздушного зазора с (варианты 1 и 2) площадь поперечного сечения ядра S_c и размеры (а и b) также малы из-за малой проводимости λ .

При малых значениях диапазона воздуха с (варианты 3 и 4) λ электропроводность велика. Поэтому размеры стержней сердечника (а и б) и площадь поперечного сечения S_c принимаются большими. Эти закономерности необходимо учитывать при расчете ОЛ, где площадь поперечного сечения мала или велика.

Таблица 4

Зависимость размеров от удельной магнитной проводимости

$\frac{m_a}{m_c}$	Эскизы рабочего воздушного пространства	Аналитические выражения размеров
$\frac{2}{2}$		$\lambda = 8.03 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}; \sigma_b = 1.559$ $S_c = 4c^2; a = c; b = 2c$
$\frac{6}{2}$		$\lambda = 6.36 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}; \sigma_b = 1.267$ $S_c = \frac{4}{3}c^2; a = \frac{c}{3}; b = 2c$
$\frac{2}{6}$		$\lambda = 18.1 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}; \sigma_b = 1.2$ $S_c = 36c^2; a = 3c; b = 6c$
$\frac{6}{6}$		$\lambda = 16.4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}; \sigma_b = 1.089$ $S_c = 12c^2; a = c; b = 6c$

В табл. 5 приведены аналитические выражения для размеров а и b для интервалов $m_a=2\div 6$ и $m_c=2\div 6$ и для поперечного сечения S_c . На основании аналитических данных, приведенных в этой таблице, можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением безразмерного коэффициента m_a уменьшаются удельная магнитная проницаемость (λ), площадь поперечного сечения S_c и ширина стержня

сердечника (а). При этом толщина сердцевин (b) не меняется.

2. С увеличением безразмерного коэффициента m_c увеличиваются λ , S_c , а и b.

3. Если коэффициент m_a слишком мал при очень больших значениях коэффициента m_c , то нарушается принцип соответствия размеров, размеры а и b сильно увеличиваются. В результате значения размера А и В больше, чем требуется.

Таблица 5

Аналитическая зависимость численных значений размеров площади поперечного сечения ядра Sc от рабочего диапазона воздуха а и b

$\begin{matrix} M_a \\ M_c \end{matrix}$	2	3	4	5	6
2	$S_c = 4c^2$ a=c ; b=2c	$S_c = \frac{8}{3}c^2$ a= $\frac{2}{3}$ c; b=2c	$S_c = 2c^2$ a=0,5c; b=2c	$S_c = \frac{8}{5}c^2$ a= $\frac{2}{5}$ c ; b=2c	$S_c = \frac{4}{3}c^2$ a= $\frac{c}{3}$; b=2c
3	$S_c = 9c^2$ a=1,5c; b=3c	$S_c = 6c^2$ a=c; b=3c	$S_c = 4,5c^2$ a=1,5c; b=3c	$S_c = 3\frac{3}{5}c^2$ a= $\frac{6}{5}$ c; b=3c	$S_c = 3c^2$ a= $\frac{1}{2}$ c; b=3c
4	$S_c = 16c^2$ a=2c; b=4c	$S_c = 10\frac{2}{3}c^2$ a= $\frac{4}{3}$ c; b=4c	$S_c = 8c^2$ a= c; b=4c	$S_c = 6\frac{2}{5}c^2$ a= $\frac{4}{3}$ c; b=4c	$S_c = 5\frac{1}{3}c^2$ a= $\frac{2}{3}$ c; b=4c
5	$S_c = 25c^2$ a=2,5 c; b=5c	$S_c = 16\frac{2}{3}c^2$ a= $\frac{5}{3}$ c; b=5c	$S_c = 12,5c^2$ a= $\frac{5}{4}$ c; b=5c	$S_c = 10c^2$ a=c; b=5c	$S_c = 8\frac{1}{3}c^2$ a= $\frac{5}{6}$ c; b=5c
6	$S_c = 36c^2$ a=3c; b=6c	$S_c = 24c^2$ a=2c; b=6c	$S_c = 18c^2$ a= $\frac{3}{2}$ c; b=6c	$S_c = 14\frac{2}{5}c^2$ a= $\frac{6}{5}$ c; b=6c	$S_c = 12c^2$ a=c; b=6c

Выводы

С использованием известных формул удельной магнитной проницаемости воздушных зазоров были получены аналитические выражения безразмерных коэффициентов (n_c и n_k) характеризующих ступенчатый характер ядра, для определения основных размеров ступенчатого индукционного левитатора и получения аналитических связей между ними.

Получены аналитические выражения зависимости размеров ядра (a,b) от рабочего диапазона воздуха (c). Площадь поперечного сечения зародыша S_c прямо пропорциональна квадрату величины воздушного зазора (c), а ширина (a) и толщина (b) зародышей прямо пропорциональны величине этого воздушный зазор (c).

Площадь поперечного сечения (S_c) сердечника и размеры стержней (a и b) увеличиваются по мере увеличения удельной магнитной проводимости (λ) рабочего воздушного зазора (c). Вариации измерений по такому закону ограничены принципом соответствия размеров индукционного левитатора.

Таким образом, ограничения на один или два негабаритных размера в задании на проект также уменьшают диапазон изменения ядерных размеров.

Список литературы:

- Абдуллаев Я.Р. Теория магнитных систем с электромагнитными экранами. Главная редакция физико-математической литературы издательство «Наука», М.2000, стр288
- Абдуллаев Я.Р. Теория и применение многофункциональных линейных индукционных подвесов. Баку, Военное издательство, 1996, 297 стр.
- Абдуллаев Я.Р. Электромагнитный расчет магнитных систем с подвижными экранами. Электричество, 2007, № 12
- Абдуллаев Я.Р., Керимзаде О.О. Определение размеров магнитной системы постоянного тока с учетом принципа соразмерности. Электричество. 2010. № 3
- Абдуллаев Я.Р., Керимзаде Г.С., Мамедова Г.В., Пириева Н.М. Проектирование электрических аппаратов с индукционными левитационными элементами, Электротехника. 2015. № 5.
- Абдуллаев Я.Р., Пириева Н.М. Расчет и проектирование управляемой индукционной опоры с левитационной обмоткой, Электромеханика. 2015. № 5