

Торшин Владимир Викторович

О РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Адрес статьи: www.gramota.net/materials/1/2011/7/17.html

Статья опубликована в авторской редакции и отражает точку зрения автора(ов) по рассматриваемому вопросу.

Источник

Альманах современной науки и образования

Тамбов: Грамота, 2011. № 7 (50). С. 72-76. ISSN 1993-5552.

Адрес журнала: www.gramota.net/editions/1.html

Содержание данного номера журнала: www.gramota.net/materials/1/2011/7/

© Издательство "Грамота"

Информация о возможности публикации статей в журнале размещена на Интернет сайте издательства: www.gramota.net

Вопросы, связанные с публикациями научных материалов, редакция просит направлять на адрес: almanac@gramota.net

УДК 621.318.3

Владимир Викторович Торшин
Институт проблем управления РАН им. В. А. Трапезникова

О РАСЧЕТЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ[©]

Рассмотрим практический расчет конструкции электромагнитов, использующую силу отталкивания. Приведем расчет динамических параметров, т.е. определим расстояние, на которое переместится объект, а также время движения, скорости и ускорения якорей электромагнитов и объекта. Пример такой конструкции приведен на Рис. 1.

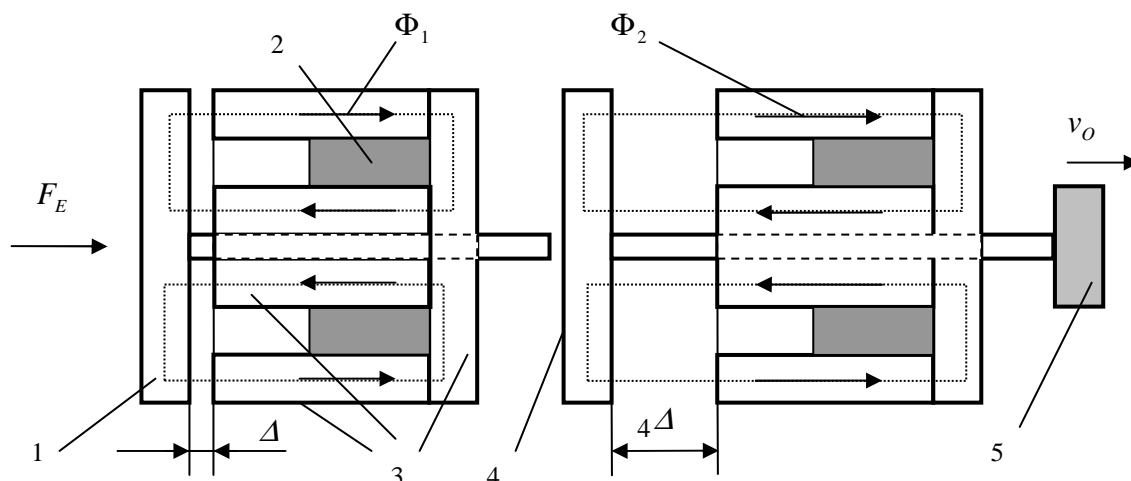


Рис. 1. Электромагнитный ударный механизм: 1 - якорь первого электромагнита; 2 - обмотка возбуждения; 3 - магнитопровод; 4 - якорь второго электромагнита; 5 - объект

На Рис. 1 показан якорь 1 первого электромагнита, который имеет рабочий зазор Δ . После срабатывания шток якоря первого электромагнита, ударяется в якорь 4 второго электромагнита, который в свою очередь воздействует на объект 5 и тем самым перемещает его на некоторое расстояние. Заметим, что рабочий зазор второго электромагнита также составляет Δ , однако в действительности, первоначально зазор якоря второго электромагнита устанавливается больше Δ .

Так, на Рис. 1 этот зазор равен 4Δ . Таким образом, расстояние, которое преодолит якорь второго электромагнита до попадания в свою рабочую зону (равную Δ) равно 3Δ . Естественно, что это расстояние может быть и большим, чем 4Δ , поскольку оно целиком определяется только силой удара якоря первого электромагнита и силой сопротивления объекта 5. После удара штока первого якоря, эту дистанцию якорь 4 пройдет по инерции, приобретя начальную скорость v_0 перед входом в свою рабочую зону, равную Δ . Движение якоря второго электромагнита передастся объекту 5, еще больше ускоряя его.

Магнитопрыводы первого и второго электромагнитов представляют собой полые цилиндры, внутри которых располагается кольцевая обмотка возбуждения 2. Направление магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 на Рис. 1 условно показано стрелками. Особенность расчета динамических параметров для схемы, показанной на Рис. 1, заключается в том, что сила притяжения первого электромагнита зависит от величины воздушного зазора. Чем меньше становится зазор, тем сила притяжения больше, причем в этом случае зависимость будет носить *гиперболический* характер. Конечной целью расчета является определение расстояния, на которое переместится объект после удара штока второго электромагнита.

На первый взгляд максимального расстояния, на которое переместится объект, можно достигнуть в том случае, когда у обоих электромагнитов рабочие зазоры равны и их суммарная мощность удваивается, однако это не так. Эксперименты показывают, что максимальное расстояние, на которое перемещается объект, достигается тогда, когда зазор между *штоком* первого электромагнита и *якорем* второго электромагнита равен нулю, а свободный пробег якоря второго электромагнита за счет силы инерции составляет $4-5\Delta$.

Вначале определим электрические параметры первого электромагнита, для этого зададимся начальными условиями. Воздушный зазор по мере приближения якоря к ярму (магнитопрыводу), уменьшается, а сила притяжения электромагнита наоборот увеличивается. Кроме того, по мере приближения к магнитопрыводу,

меняется магнитный поток в зазоре, и, как следствие, величина магнитной индукции. Поэтому, прежде чем вычислить *электромагнитную силу притяжения*, необходимо знать зависимость изменения *магнитного потока и магнитной индукции* от величины воздушного зазора.

Магнитный поток может быть подсчитан по формуле [1].

$$\Phi = (Iw)_k \cdot G_{\Delta} = (Iw)_k \cdot \frac{\mu_0 \cdot S}{\Delta}, \text{ Вб} \tag{1}$$

где G_{Δ} - магнитная проводимость воздушных зазоров, G_n, S - площадь магнитопровода, участвующая в проведении магнитного потока в воздушном зазоре Δ , I - ток в обмотке возбуждения электромагнита, w - число витков обмотки возбуждения электромагнита.

Значение магнитной индукции можно рассчитать по формуле [Там же]:

$$B = \frac{\Phi}{S}, \text{ Тл} \tag{2}$$

Окончательно величина электромагнитной силы притяжения может быть подсчитана как:

$$F_{\text{э}} = \frac{B^2 \cdot S}{2 \mu_0}, \text{ Н} \tag{3}$$

где μ_0 - магнитная проницаемость воздушной среды, $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$.

Для примера практического расчета зададимся начальными условиями. Пусть внешний диаметр магнитопровода равен $D_{\text{э}} = 12 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, внутренний диаметр магнитопровода $d_{\text{э}} = 10 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Внутренний диаметр катушки возбуждения равен диаметру внутренней части магнитопровода, т.е. $d_{\text{кв}} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Число витков обмотки возбуждения равно $w_k = 1000$, а ток в цепи обмотки составляет $I_k = 5 \text{ А}$. Воздушный зазор Δ между якорем и магнитопроводом может изменяться в диапазоне от 1 мм до 2 см. Масса якоря обоих электромагнитов составляет $m_{\text{я}} = 0,15 \text{ кг}$. Предположим, что объект представляет собой груз весом $P_0 = 50 \text{ Н}$, размещенный на платформе, которая передвигается по рельсам на колесах. Радиус колес платформы составляет $r_k = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Масса платформы равна $m_p = 0,4 \text{ кг}$.

Для расчета параметров воспользуемся математической программой *MathCAD* [2]. Вначале подсчитаем активную площадь якоря для проведения магнитного потока. Эта площадь складывается из торцевой внутренней площади магнитопровода и торцевой площади стенки цилиндра магнитопровода. Таким образом, можно записать:

$$S = \frac{\pi \cdot d_{\text{кв}}^2}{4} + \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{э}}^2 - d_{\text{э}}^2) \tag{4}$$

При заданных параметрах эта площадь будет равна: $S = 6,283 \times 10^{-3} \text{ м}^2$

Представим, что величина воздушного зазора меняется в заданном диапазоне с шагом 1 мм, т.е.

$$\Delta := 0,1 \times 10^{-2} \text{ м}, 0,2 \times 10^{-2} \text{ м}, \dots, 2 \times 10^{-2} \text{ м}$$

Для практических расчетов составим матрицу Δ для значений воздушного зазора. Используя эту матрицу и формулы (1)-(3), получим следующие значения параметров:

$\Delta_j =$							
1·10 ⁻³	m	Δ :=					
2·10 ⁻³			1 × 10 ⁻³	0	0	0	
3·10 ⁻³			2 × 10 ⁻³	0	0,039	0	6,283
4·10 ⁻³			3 × 10 ⁻³	1	0,02	1	3,142
5·10 ⁻³			4 × 10 ⁻³	2	0,013	2	2,094
6·10 ⁻³			5 × 10 ⁻³	3	9,87·10 ⁻³	3	1,571
7·10 ⁻³			6 × 10 ⁻³	4	7,896·10 ⁻³	4	1,257
8·10 ⁻³			7 × 10 ⁻³	5	6,58·10 ⁻³	5	1,047
9·10 ⁻³			8 × 10 ⁻³	6	5,64·10 ⁻³	6	0,898
0,01			9 × 10 ⁻³	7	4,935·10 ⁻³	7	0,785
0,011			0,01	8	4,386·10 ⁻³	8	0,698
0,012			0,011	9	3,948·10 ⁻³	9	0,628
0,013	0,012	10	3,589·10 ⁻³	10	0,571		
...	0,013	11	3,29·10 ⁻³	11	0,524		
	0,014	12	...	12	...		
	0,015						
	0,016						
	0,017						
	0,018						
	0,019						
	0,02						

Естественно, табличные значения приводятся не полностью в виду ограниченности объема статьи.

Чтобы вычислить ускорения, которые будет испытывать якорь первого электромагнита без учета разгона якоря второго электромагнита и объекта, воспользуемся известной формулой Ньютона. Итак, поскольку $F = m_j \cdot a(\Delta)$, то без учета сил трения ускорение можно вычислить по формуле:

$$a(\Delta) = \frac{F}{m_j} \quad (5)$$

где m_j - масса якоря.

Расчетные значения ускорений первого электромагнита с учетом шага изменения зазора, сведены в таблицу (Рис. 2). На основании полученных значений на Рис. 2 показан график изменения величины ускорения в зависимости от величины воздушного зазора.

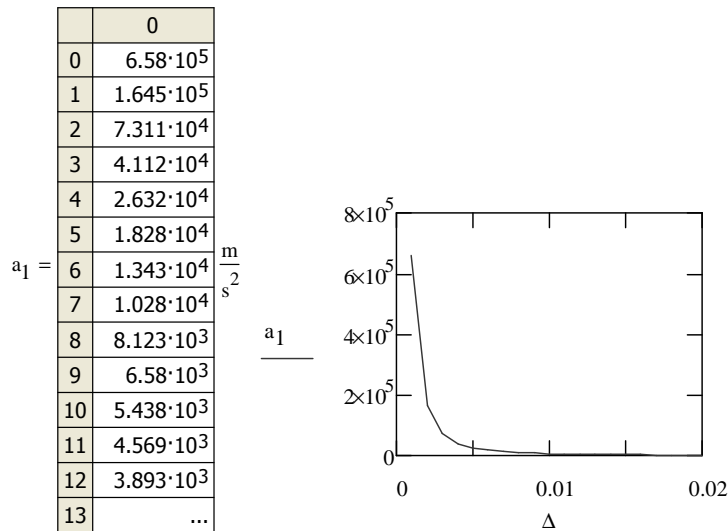


Рис. 2. Таблица и график изменения величины ускорения в рабочем зазоре первого электромагнита

С учетом массы якоря второго электромагнита и веса объекта зависимость величины ускорения от величины рабочего зазора будет выглядеть несколько иначе. В этом случае приходится учитывать инерционную составляющую якоря второго электромагнита. Ускорение, которое развивает якорь первого электромагнита с учетом массы якоря второго электромагнита и массы объекта, можно подсчитать по следующей формуле:

$$a(\Delta) = \frac{F}{2 \cdot m_j + \frac{P_0}{g}}, \quad (6)$$

где P_0 - вес объекта; g - ускорение силы тяжести.

Расчетные значения ускорений первого электромагнита с учетом шага изменения зазора, массы якоря второго электромагнита и веса объекта, сведены в таблицу (Рис. 3). По полученным значениям на Рис. 3 приведен график изменения величины ускорения в зависимости от величины воздушного зазора.

Представленный график подобен графику, изображенному на Рис. 2. Заметим, что полученные значения ускорений сведены в матрицу «А», а каждый член матрицы представляет собой ускорение в конце выбранного шага.

Итак, сделав предварительные замечания и расчеты, можно приступить к вычислению основных динамических параметров: времени движения якорей электромагнитов и объекта, скорости, дистанции которую преодолит объект после срабатывания электромагнитов. Путь, пройденный любым телом можно вычислить по известной формуле:

$$S = v \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}, \quad (7)$$

где v - скорость тела, a - ускорение, t - время в пути.

Наша задача осложняется тем обстоятельством, что при прохождении якорем воздушного рабочего зазора с заданным шагом 1 мм, изменяется величина силы тяги электромагнита (она увеличивается), и, следовательно, ускорение. Поэтому в качестве пути S необходимо выбрать величину этого шага. Исходя из этого, можно подсчитать время прохождения шага t , решив уравнение (7) относительно t .

$$t = \frac{2 \cdot \left(\frac{\sqrt{v_0^2 + 2 \cdot S \cdot a}}{2} - \frac{v_0^2}{2} \right)}{a} \quad (8)$$

Соответственно этому времени будет изменяться и скорость в конце шага пути равному 1 мм. Тогда можно записать выражение для скорости в следующем виде:

$$v = v_0 + at, \tag{9}$$

где v - скорость в конце прохождения шага, v_0 - скорость в начале шага, t - время прохождения шага.

	0
0	$1.828 \cdot 10^4$
1	$4.57 \cdot 10^3$
2	$2.031 \cdot 10^3$
3	$1.143 \cdot 10^3$
4	731.274
5	507.829
6	373.099
7	285.654
8	225.702
9	182.818
10	151.09
11	126.957
12	...

$A = \frac{m}{s^2}$

$$A_0 = 1.828 \times 10^4 \frac{m}{s^2}$$

$$A_{19} = 45.705 \frac{m}{s^2}$$

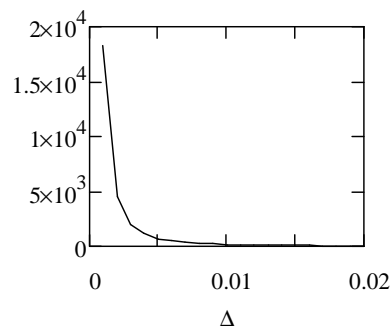


Рис. 3. Таблица и график изменения величины ускорения в рабочем зазоре первого электромагнита с учетом массы якоря второго электромагнита и массы объекта

В соответствие с формулами (7)-(9), и значениями ускорений, приведенными на Рис. 3, ниже приводятся данные расчета скорости и времени прохождения воздушного рабочего зазора якорем первого электромагнита. В первоначальный момент, когда якоря первого и второго электромагнитов вместе с объектом находятся в неподвижном состоянии, выражение для времени прохождения якоря первого нулевого шага S (напомним, что все шаги равнозначны и составляют $1 \times 10^{-3} m$) и скорости в конце первого шага, приобретают вид:

$$S := 1 \times 10^{-3} m \quad t_0 := \sqrt{\frac{2 \cdot S}{A_{19}}} \quad t_0 = 6.615 \times 10^{-3} s \quad v_0 := A_{19} \cdot t_0 \quad v_0 = 0.302 \frac{m}{s}$$

На следующем этапе скорость будет определяться по формуле (9). В этом случае выражения для времени и скорости будут выглядеть следующим образом:

$$t_1 := \frac{2 \cdot \left(\frac{\sqrt{v_0^2 + 2 \cdot S \cdot A_{18}}}{2} - \frac{v_0}{2} \right)}{A_{18}} \quad t_1 = 2.698 \times 10^{-3} s \quad v_1 := v_0 + A_{18} \cdot t_1 \quad v_1 = 0.439 \frac{m}{s}$$

Расчетные данные для последующих шагов сведены в матрицы для времени и скорости. Ввиду ограниченности пространства, данные расчета, приводятся не полностью.

$$t := (t_0 \ t_1 \ t_2 \ t_3 \ t_4 \ t_5 \ t_6 \ t_7 \ t_8 \ t_9 \ t_{10} \ t_{11} \ t_{12} \ t_{13} \ t_{14} \ t_{15} \ t_{16} \ t_{17} \ t_{18} \ t_{19}) \tag{10}$$

	0	1	2	3	4
t	$6.615 \cdot 10^{-3}$	$2.698 \cdot 10^{-3}$	$2.017 \cdot 10^{-3}$	$1.653 \cdot 10^{-3}$...

s

$$v := (v_{19} \ v_{18} \ v_{17} \ v_{16} \ v_{15} \ v_{14} \ v_{13} \ v_{12} \ v_{11} \ v_{10} \ v_9 \ v_8 \ v_7 \ v_6 \ v_5 \ v_4 \ v_3 \ v_2 \ v_1 \ v_0)$$

	0	1	2	3	4	5	6	7
v	7.639	4.669	3.558	2.932	2.512	2.201	1.957	...

$\frac{m}{s}$

(11)

Общее время прохождения якоря первого электромагнита рабочего зазора можно подсчитать суммируя члены таблицы (10).

$$t := t_0 + t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10} + t_{11} + t_{12} + t_{13} + t_{14} + t_{15} + t_{16} + t_{17} + t_{18} + t_{19}$$

$$t = 0.024 \text{ s}$$

По полученным расчетным параметрам можно построить график изменения скорости якоря первого электромагнита в воздушном рабочем зазоре (Рис. 4). Поскольку матрица изменения шага воздушного зазора Δ является вертикальной матрицей, то для построения зависимости скорости от величины зазора необходимо транспонировать матрицу скорости (11).

	0	
0	7.639	
1	4.669	
2	3.558	
3	2.932	
4	2.512	
5	2.201	
$v^T =$	6	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$
	7	1.756
	8	1.585
	9	1.436
	10	1.302
	11	1.181
	12	1.068
	13	...

$$\left(v^T \right)_{19} = 0.302 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\left(v^T \right)_0 = 7.639 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

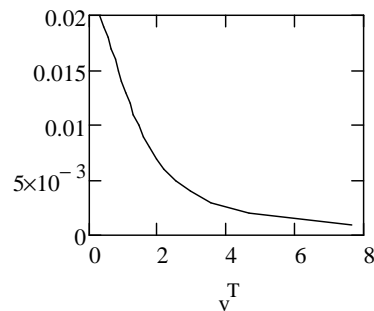


Рис. 4. Зависимость скорости движения якоря первого электромагнита в рабочем зазоре

Итак, в конце пути (прохождения якоря первого электромагнита своего рабочего зазора), якорь *второго* электромагнита вместе с *объектом* приобретут начальную скорость $v = 7,639 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Последующее движение якоря второго электромагнита будет проходить по инерции до попадания в свою рабочую зону для дальнейшего разгона объекта. На этом этапе скорость движения будет равномерно падать вследствие торможения силами трения якоря и объекта. Но в виду незначительной силы трения скорость в начальной точке рабочей зоны второго электромагнита составит $v = 7,629 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Более подробно о расчете этой скорости и других динамических параметров электромагнитов ударного действия можно ознакомиться в литературе [3].

Таким образом, якорь второго электромагнита начнет движение не с точки, когда скорость равна нулю, и необходимо преодолеть начальное сопротивление неподвижного объекта, а тогда, когда якорь и объект приобретут уже определенную скорость. Расчеты показывают, какие расстояния пройдет объект при разных схемах включения электромагнитов. К сожалению, в этой статье привести их не представляется возможным, однако некоторые результаты мы все-таки представим.

Если сравнивать расстояние, на которое перемещается объект, то в случае наличия инерционной составляющей расстояние на которое переместится объект, составит 60,281 м. В том случае, когда первоначальные рабочие зазоры у обоих электромагнитов одинаковые и равны Δ , действие двух электромагнитов переместит объект на 49,097 м. Если будет задействован только *один* электромагнит, то дистанция, которую преодолит объект, составит всего 29,756 м [Там же]. Такие результаты расчетов хорошо согласуются с реальными экспериментами с моделями электромагнитов ударного действия [4].

Список литературы

1. Буль Б. К., Буткевич Г. В. и др. Основы теории электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1970. С. 600.
2. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в *MathCad 14*. СПб.: Питер, 2007. 592 с.
3. Торшин В. В., Пашенко Ф. Ф., Круковский Л. Е. Электрические машины и аппараты на основе логического анализа законов электродинамики. М.: БЕЛЫЙ БЕРЕГ, 2010. С. 264.
4. Торшин В. В., Старовойтов В. П. О расширении диапазона действия электромагнитов // Альманах современной науки и образования. Тамбов: Грамота, 2010. № 6 (37). С. 46-50.