

Рис. 5

пульса, не меньший веса самого летательного аппарата. Значит, давление на стартовую площадку, создаваемое струями, должно быть больше, чем нагрузка на крыло:

$$p_{\downarrow} \sim \frac{G}{N_c \pi r_c^2} > \frac{G}{S},$$

где  $N_c$  – число струй. Мало того, тут речь идет не только о давлении – струи представляют собой высокоскоростной поток раскаленных газов, способных прожигать палубу авианосцев. Не случайно Иезекииль упоминает об углях под херувимами.

Но что такое многочисленные «очи», покрывающие всю

вектором тяги), как у современных нам самолетов Як-49 (Россия) или Харриер (Англия). После вертикального взлета «на струях» эти самолеты переходят в горизонтальный полет, становясь «на крыло». Качественно изменение силы тяги двигателей изображено на рисунке 5. Видно, что в режиме «висения» струи двигателей должны создавать поток импульса, не меньший веса самого летательного аппарата.

поверхность херувимов? На определенном этапе развития авиации обшивка самолетов делалась из гофрированного дюралюминия, который обеспечивал жесткость конструкции. (В чем легко убедиться, собрав лист бумаги гармошкой – после этого его труднее согнуть.) Такой самолет выглядел «полосатым». С ростом скорости полета возникла проблема аэродинамического нагрева. И оказалось, что можно увеличить теплоотвод при помощи рельефного теплозащитного покрытия в виде кольцеобразных уступов, чередующихся по всей длине боковой поверхности летательного аппарата. (В настоящее время инженеры и ученые интенсивно исследуют такие покрытия.)

Итак, что же видел Иезекииль? Похоже, это был крылатый летательный аппарат вертикального взлета/посадки, который производил впечатляющий шум и оставлял под собою «горящие угли». Он обладал четырьмя реактивными двигателями и, конечно, колесами, которые больше всего потрясли Иезекииля. Габариты аппарата можно оценить сверху, учитывая, что из площади упомянутого двора ( $50 \times 100$  локтей, или  $22 \times 44$  метра) нужно вычесть площадь храма («Дома»,  $20 \times 60$  локтей). Таким образом, этот летательный аппарат мог иметь характерные размеры порядка десятка метров.

Но кому он мог принадлежать? Иным планетам? Или остаткам прежней земной цивилизации, которая, угасая, пыталась внушить оставшимся «неразвитым странам» благие мысли? И не придется ли землянам после грядущих глобальных катастроф (экологических, военных, социальных...) вновь изобретать «херувимов» через тысячи лет?

## Как исследовать магнитную катушку

**С.МЯГМАРСУРЭН**

**О**БСУДИМ ОДИН ИЗ ВОЗМОЖНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ магнитной индукции и энергии магнитного поля катушки.

Энергию магнитного поля катушки индуктивности можно определить, используя взаимные преобразования энергии: электрической – магнитной – тепловой – электрической. Соберем установку, электрическая схема которой показана на рисунке 1. В качестве индукционной катушки мы использовали электромагнит, состоящий из дроссельной катушки и сердечника с двумя полюсными наконечниками, повернутыми плоскими сторонами друг к другу. При замыкании ключа  $K$  в положение 1 ток  $I$  проходит по катушке индуктивностью  $L$ , за счет чего в катушке образуется ЭДС самоиндукции

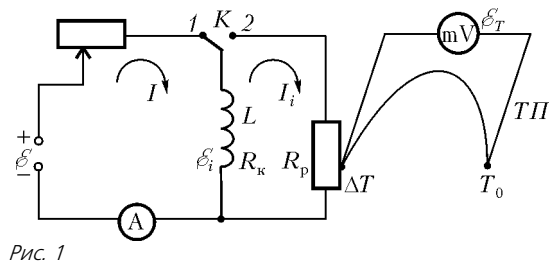


Рис. 1

$\varepsilon_i = -L \frac{dI}{dt}$ . Согласно правилу Кирхгофа,

$$I = \frac{\varepsilon + \varepsilon_i}{R}, \text{ или } \varepsilon = IR - \varepsilon_i = IR + L \frac{dI}{dt}.$$

Здесь  $R$  – сумма сопротивления реостата и омического сопротивления катушки. За время  $dt$  источник электрической энергии совершает работу, равную

$$\varepsilon I dt = I^2 R dt + LI dI.$$

Первое слагаемое в этой формуле выражает тепло Джоуля – Ленца, которое выделяется на сопротивлении  $R$ , а второе – дополнительную работу, обусловленную явлением самоиндукции. Следовательно, дополнительная работа, расходуемая на увеличение тока в цепи от 0 до значения  $I$ , является энергией магнитного поля  $W$ :

$$W = \int_0^I LI dI = \frac{LI^2}{2}.$$

А теперь замкнем ключ в положение 2 – в правой цепи ток самоиндукции  $I_i$  проходит через омическое сопротивление

(Продолжение см. на с. 34)

(Начало см. на с. 31)

катушки  $R_k$  и сопротивление резистора  $R_p$ , на которых и выделяются количества теплоты  $Q_k$  и  $Q_p$  соответственно. Таким образом, энергия, запасенная в магнитном поле катушки, переходит в электрическую, а затем в тепловую.

Согласно закону сохранения энергии,

$$\frac{W}{Q_p} = \frac{R_k + R_p}{R_p}.$$

В этом выражении сопротивления  $R_k$  и  $R_p$  есть известные и точно измеряемые параметры. Поэтому для определения  $W$  нам придется узнать величину  $Q_p$ .

Используем уравнение теплового баланса:

$$Q_p = mc\Delta T,$$

где  $m$  – масса материала, имеющего сопротивление  $R_p$ ,  $c$  – удельная теплоемкость того же материала,  $\Delta T$  – изменение его температуры. Величину  $\Delta T$  измеряют термопарой ТП – для этого измерительный контакт прибора прикрепляется внутри витков резистора сопротивлением  $R_p$ , а другой, сравнивающий, контакт поддерживают при комнатной температуре  $T_0$  (см. рис.1). Температурная разность контактов термопары  $\Delta T$  прямо пропорциональна межконтактной разности потенциалов, т.е. термо-ЭДС  $\mathcal{E}_T$ . С учетом этого факта получим

$$Q_p = mc \frac{\mathcal{E}_T}{\delta},$$

где  $\delta$  – чувствительность термопары, измеряемая в милливольтх на кельвин.

Если выбрать сопротивление резистора  $R_p$  значительно больше, чем сопротивление катушки  $R_k$ , то эффект преобразования магнитной энергии в тепловую хорошо прослеживается. Поэтому в качестве резистора используют проволоочную спираль, сделанную из сплава с большим удельным сопротивлением. В подавляющем большинстве случаев для такого металлического сплава удельная теплоемкость неизвестна, так что нам придется определить эту величину. Для этого мы придумали маленькую хитрость.

Соберем электрическую схему – такую же, как на рисунке 1, только без катушки индуктивности. Резистор, по которому течет ток  $I'$  в течение времени  $t$ , нагревается, и в нем выделяется некоторое количество теплоты. Если при этом не возникает никаких других форм энергии, то, по закону сохранения энергии,

$$I'^2 R_p t = mc\Delta T'.$$

Используя ту же термопару, определим новое изменение температуры:  $\Delta T' = \frac{\mathcal{E}'_T}{\delta}$ . Поэтому можно записать

$$\frac{mc}{R_p \delta} = I'^2 \frac{t}{\mathcal{E}'_T} = \text{const}.$$

В этом выражении  $\mathcal{E}'_T$  пропорционально времени  $t$  (с момента включения ключа  $K$  до окончания измерения). Величины  $I'$ ,  $\mathcal{E}'_T$ ,  $t$  экспериментально измеряются. Таким образом, во второй части опыта можно определить удельную теплоемкость  $c$  для любых электропроводящих материалов.

Используя выражения для количества теплоты  $Q_p$  и удельного сопротивления  $c$ , для энергии магнитного поля получим

$$W = \frac{LI^2}{2} = Q_p = A\mathcal{E}_T,$$

где  $A$  – постоянная прибора, которая равна

$$A = (R_k + R_p) \frac{mc}{R_p \delta} = (R_k + R_p) I'^2 \frac{t}{\mathcal{E}'_T}.$$

На самом деле, энергия магнитного поля является функцией двух переменных – силы тока  $I$  и расстояния между полюсами электромагнита  $d$ . Для определения энергии магнитного поля в зазоре электромагнита нами экспериментально построены графики зависимости термо-ЭДС от силы тока при разных значениях  $d$  (рис.2). Из графиков видно, что

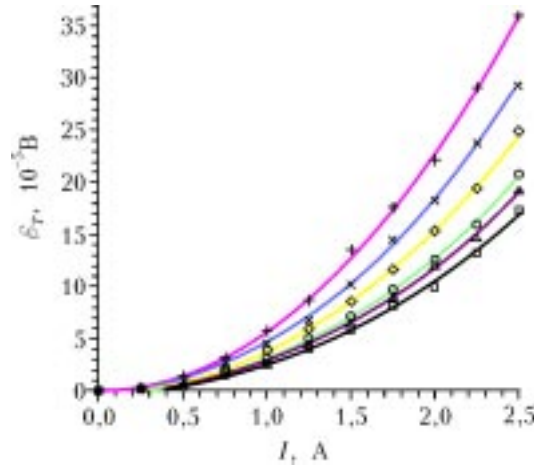


Рис.2. Зависимость термо-ЭДС от силы тока при разных значениях межполюсного расстояния  $d$  (6, 9, 13, 20, 27 и 35 мм, если двигаться сверху вниз)

зависимость  $\mathcal{E}_T(I)$  – квадратичная. Значит, зависимость термо-ЭДС от квадрата тока будет линейной. Таким образом, для нашего прибора получаются вольт-амперные характеристики вида  $\mathcal{E}_T(I, d) = K(d)I^2$ , а их коэффициенты  $K(d)$  являются, в свою очередь, функцией  $d$ . Это приводит к следующему выражению для  $W$ :

$$W(I, d) = A\mathcal{E}_T(I, d) = AK(d)I^2,$$

где коэффициент  $AK(d)$ , согласно формуле  $W = \frac{LI^2}{2}$ , будет выражать индуктивность катушки  $L$ , точнее  $L/2$ .

Наконец, используя вольт-амперные характеристики, построим градуировочный график зависимости  $K(d)$  (рис.3). Такая градуировка и представляет собой измеритель энергии магнитного поля, создающегося в данном электромагните при любых значениях силы тока и расстояния между его

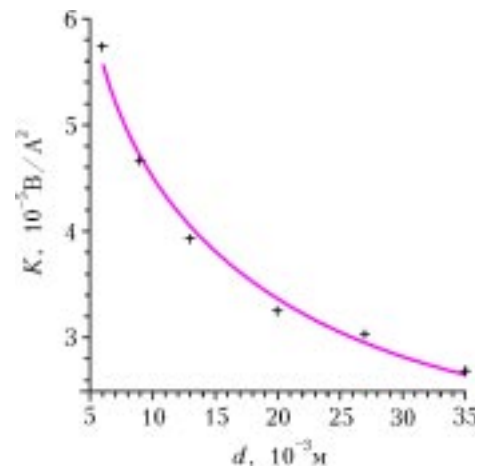


Рис.3. Градуировочный график зависимости  $K$  от  $d$

полюсами. А последнее выражение для  $W(I, d)$  является эмпирически полученной нами формулой (основанной на опыте) для определения магнитной энергии данного электромагнита.

Теперь приступим к определению магнитной индукции поля. Разделив выражение для  $W(I, d)$  на объем воздушного зазора между полюсами электромагнита, получим объемную плотность магнитной энергии (всеми нежелательными краевыми эффектами мы будем пренебрегать):

$$w(I, d) = \frac{AK(d)}{Sd} I^2,$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения полюса электромагнита. С другой стороны, объемная плотность магнитного поля прямо пропорциональна квадрату магнитной индукции  $B$  в данном месте пространства:

$$w(I, d) = \frac{B^2}{2\mu\mu_0},$$

где  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества,  $\mu_0$  – магнитная постоянная. Из сопоставления двух последних выражений следует, что магнитная индукция и сила тока связаны соотношением

$$B(I, d) = \sqrt{\frac{2\mu\mu_0 AK(d)}{Sd}} I.$$

Поскольку для данного электромагнита градуировка  $K(d)$

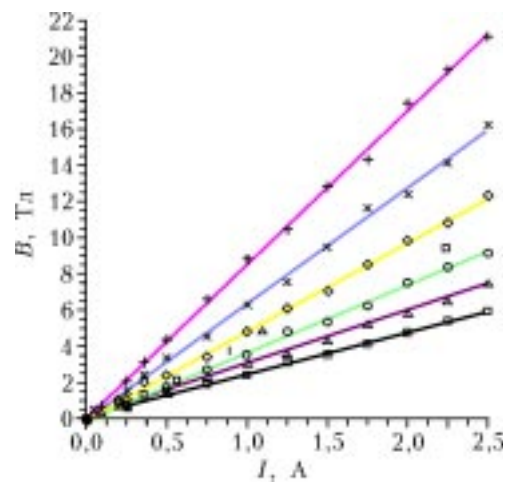


Рис.4. Зависимость магнитной индукции от силы тока при разных значениях межполюсного расстояния  $d$

уже установлена, можно графически построить семейство зависимости  $B(I, d)$  (рис.4). Из полученных графиков магнитная индукция непосредственно определяется без измерения и без вычисления при разных значениях либо  $d$ , либо  $I$ . Таким образом, мы получили эмпирическую формулу и создали градуировочные кривые для определения индукции магнитного поля.

# Принцип Торричелли и центробежная сила инерции

**А.БУРОВ**

**В** СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ ПОЧЕМУ-ТО ОЧЕНЬ «БОЯТСЯ» СИЛЫ инерции. Как так – что это за сила, которая не хочет подчиняться третьему закону Ньютона? Тем не менее, каждому приходится сталкиваться с этой силой по многу раз на дню, и, вероятно, пришло время поговорить о некоторых ее «кажущихся» странностях.

Начнем с задачи.

**Задача 1.** В горизонтальной плоскости на пружинке крутят камень с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Найдите установившееся движение системы и исследуйте устойчивость этого движения, если длина пружинки в нерастянутом состоянии  $l$ , жесткость пружинки  $k$ , а масса камня  $m$ .

**Первое решение.** В школе, вероятно, эту задачу стали бы решать так. Центробежное ускорение камня равно  $a = -\omega^2 r$ , где  $r$  – длина пружинки в растянутом состоянии.

Знак «минус» указывает на то, что  $r$  отсчитывается от неподвижной точки, а центростремительное ускорение направлено к этой точке. Далее, со стороны пружинки на камень действует сила упругости  $F = -k(r - l)$ , и радиус  $R$  установившегося движения (а им окажется равновесие относительно равномерно вращающейся с угловой скоростью  $\omega$  системы отсчета) будет определяться из уравнения

$$-m\omega^2 r = -k(r - l).$$

Отсюда легко находим значение радиуса:

$$R = \frac{kl}{k - m\omega^2}.$$

Видно, что при  $\omega = 0$  система не вращается, и длина пружинки равна  $l$ . При возрастании  $\omega$ , до разумных пределов, знаменатель в выражении для  $R$  начинает уменьшаться, а само  $R$  – увеличиваться, что и соответствует нашему повседневному опыту. При неразумно больших значениях  $\omega$  закон Гука для силы упругости перестает выполняться, пружинка обрывается, а камень улетает – как правило, по касательной.

Относительно устойчивости найденного движения трудно сделать какие-либо определенные выводы.

**Второе решение.** Отважный, по крайней мере по отношению к центробежным силам инерции, человек стал бы решать эту задачу, возможно, так. Наблюдатель, равномерно вращающийся вместе с пружинкой с угловой скоростью  $\omega$ , видит, что на камень действуют центробежная сила инерции  $F_{\text{и}} = m\omega^2 r$  и упругая сила  $F_{\text{у}} = -k(r - l)$ , поэтому можно записать условие равновесия в виде

$$F_{\text{и}} + F_{\text{у}} = m\omega^2 r - k(r - l) = 0,$$

из которого получается то же самое значение радиуса  $R$ .

Более того, этот наблюдатель заметит, что как упругая сила, так и центробежная сила инерции – *потенциальны*, т.е.