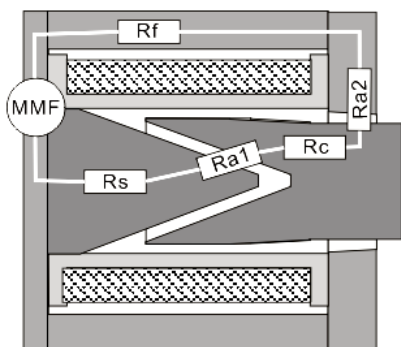


В конструкции возвратно – поступательного привода трибометра использованы электромагниты, имеющие подвижный якорь и неподвижный ограничитель движения якоря. Ток, протекающий через обмотку, создает электромагнитный поток в стальных частях узла: стальной рамке, якоря и ограничителе. Стальные части разделены воздушными зазорами, магнитная проводимость которых в сотни раз ниже проводимости стали. Система стремится уменьшить полное магнитное сопротивление, что достигается за счет уменьшения воздушных промежутков. Сила, с которой якорь притягивается к ограничителю, определяется как  $Q=dL/dg$ , где  $dL$  - изменения индуктивности электромагнита при перемещении якоря  $dg$ . Эта формула редко используется для расчетов, поскольку сложно определить изменение индуктивности электромагнита.



Подвижный якорь, рамка, ограничитель и воздушные зазоры, можно рассматривать как магнитные сопротивления, что позволяет рассчитать магнитную схему, сведя ее к электрическому аналогу. Основными элементами такой цепи являются магнитное сопротивление якоря **Rc**, сопротивление рамки **Rf**, ограничителя **Rs** и двух воздушных зазоров: основного **Ra1** и паразитного **Ra2**. Основной зазор разделяет якорь и ограничитель. Его геометрия определяет тяговые характеристики электромагнита. Паразитный зазор всегда существует между якорем и рамкой. В противном случае перемещение якоря было бы невозможным. Как правило,

толщину этого зазора стремятся сделать как можно меньше при увеличении площади области взаимодействия якоря и рамки. Это дает возможность уменьшить величину паразитного сопротивления, однако приводит к увеличению силы трения между якорем и рамкой в случае использования антифрикционной втулки.

Магнитодвижущая сила (ММФ) **Fm**, создаваемая обмоткой, является аналогом напряжения в электрической цепи. Ток в **I** Ампер, протекающий через **n** витков катушки, создает **Fm** в **nI** Ампер - витков. Магнитодвижущая сила создает магнитный поток **Φ** в цепи магнитных резисторов подобно току в электрической цепи.

Плотность потока **B** является отношением потока **Φ** к площади поперечного сечения магнитопровода, в котором он циркулирует. Сила, произведенная электромагнитом, может быть вычислена как

$$Q=B_{a1}^2 S_{a1} / 2 \mu_0 \quad (1)$$

где  $B_{a1}$  – плотность магнитного потока в основном зазоре;  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  - универсальная магнитная постоянная в вакууме;  $S$  - площадь поперечного сечения основного воздушного зазора. Эта формула наиболее часто используется в инженерных расчетах.

Магнитный поток  $\Phi=BS$  одинаков для всех элементов магнитной цепи (ограничителя, якоря, рамки и воздушных зазоров):

$$B_s S_s = B_c S_c = B_f S_f = B_{a1} S_{a1} = B_{a2} S_{a2} \quad (2)$$

Плотность потока может быть бесконечно большой в воздушных зазорах, однако она ограничена для стали и других магнитных материалов вследствие эффекта насыщения. Когда плотность потока в железе превышает значение  $B_c \approx 0.8$  Тесла, часть электрической энергии тратится на нагрев обмотки вместо увеличения тягового усилия. По причине существования эффекта насыщения, для увеличения усилия, производимого электромагнитом, недостаточно одного увеличения тока обмотки. Требуется увеличивать диаметр якоря и ограничителя, а также площади поперечного сечения рамки, замыкающей магнитную цепь.

Основной воздушный зазор между якорем и ограничителем движения имеет коническую форму. Это решение используется в конструкциях электромагнитов, имеющих повышенные диапазоны перемещений. Тяговое усилие в этом случае уменьшается, однако становится более равномерным для различных положений якоря за счет плавного изменения длины воздушного зазора.

Площадь сечения основного зазора определяется как

$$S_{a1} = \pi D_c^2 / 4 \sin(\alpha/2) \quad (3)$$

$$\text{Площадь сечения якоря } S_c = \pi D_c^2 / 4 \quad (4)$$

Здесь  $D_c$  - диаметр якоря;  $\alpha$  - угол у вершины конуса.

В силу того, что  $B_c S_c = B_{a1} S_{a1}$  (2), величина  $B_{a1}$  может быть найдена как  $B_{a1} = B_c \sin(\alpha/2)$

Из формулы 1 определяем  $Q = B_c^2 S_{a1} \sin(\alpha/2)^2 / 2 \mu_0$ ;  $S_{a1} = Q 2 \mu_0 / B_c^2 \sin(\alpha/2)^2$  и

$$D_c = Q 8 \mu_0 / \pi B_c^2 \sin(\alpha/2) \quad (5)$$

Эта формула позволяет определить диаметр якоря в случае, когда плотность магнитного потока в нем не превышает  $B_c = 0.8$  Тесла для данного максимального тягового усилия.

Находим магнитный поток:

$$\Phi = B_c \pi D_c^2 / 4 \quad (6)$$

Определяем магнитодвижущую силу  $Fm = \Phi(R_c + R_f + R_s + R_{a1} + R_{a2})$

На практике во внимание принимается только сопротивление воздушных зазоров, поскольку магнитное сопротивление железа в сотни раз меньше, и его вклад учитывает поправочный коэффициент 1.03:

$$Fm = 1.03 \Phi(R_{a1} + R_{a2}) \quad (7)$$

Магнитное сопротивление воздушного промежутка длиной  $g$  площади  $S$  равно

$$R = g / \mu_0 S \quad (8)$$

После определения  $R_{a1}$  и  $R_{a2}$ , число витков обмотки  $n$  находится из формулы

$$Fm = nI \quad (9)$$

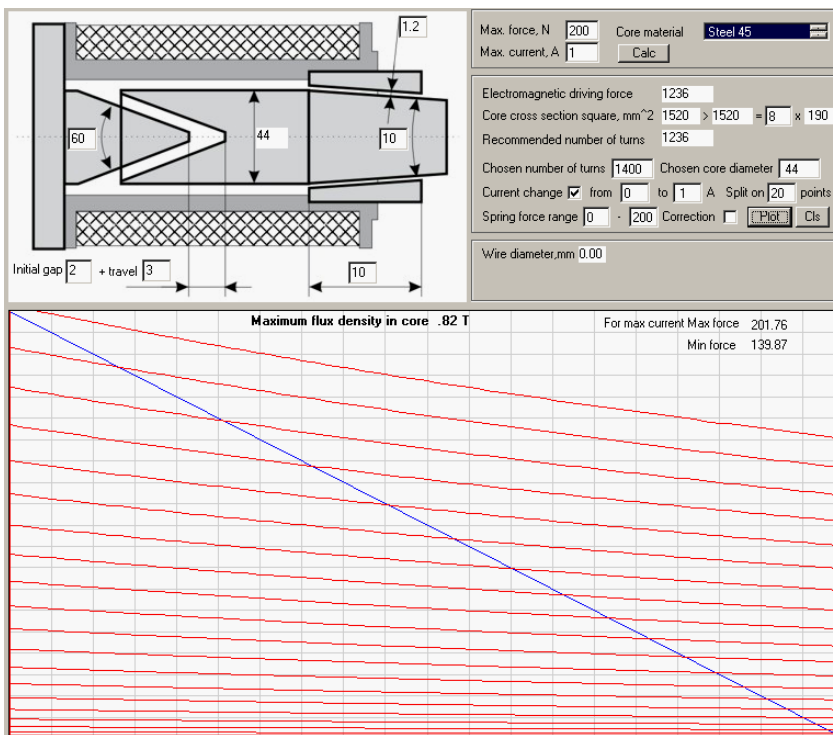
Здесь  $I$  - ток, протекающий через обмотку.

Диаметр провода обмотки определяется как

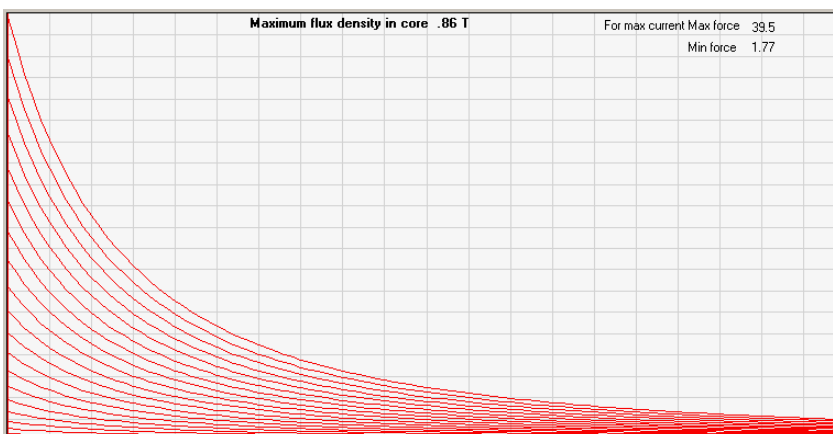
$$d_w = 1.14(I/\Delta I) \text{ где } \Delta I - \text{допустимая плотность тока в проводнике (для меди } \Delta I = 6 \text{ A/mm}^2)$$

На этом этапе все основные параметры электромагнита определены. Следующий шаг заключается в создании требуемой зависимости тягового усилия от положения якоря при фиксированном токе обмотки. Для этого подбирается угол конуса  $\alpha$ . Обычно, большие значениям угла  $\alpha$  выбираются для электромагнитов малых перемещений, а меньшие значения угла – для электромагнитов больших перемещений. При уменьшении значения  $\alpha$  до нуля, электромагнит перестает создавать рабочее усилие, так как при перемещении якоря не происходит изменения индуктивности системы.

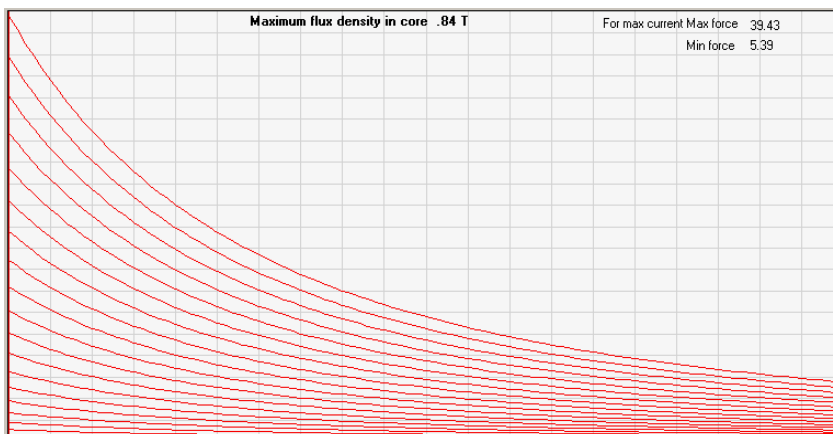
Для расчета параметров электромагнита и достижения требуемой зависимости тягового усилия от перемещения якоря, была написана специализированная программа.



Электромагнит с  $\alpha=180^\circ$  (плоский якорь) не может быть использован в микротрибометре в силу высокой нелинейности тяговой характеристики:



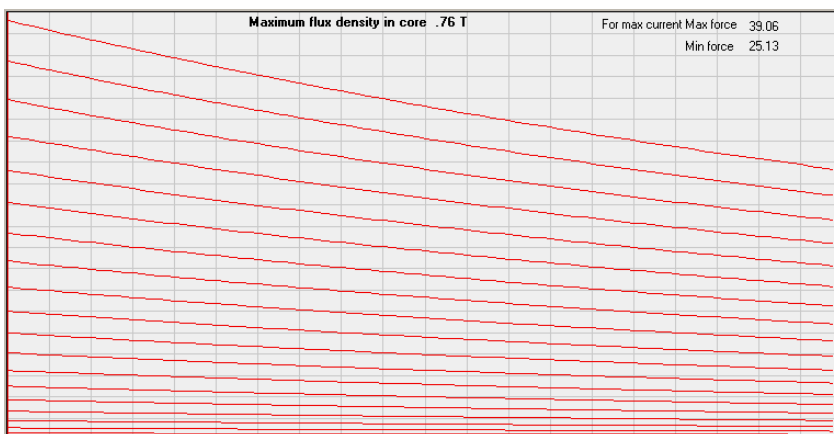
Ситуация улучшается при уменьшении угла до  $40^\circ$ -  $60^\circ$ :



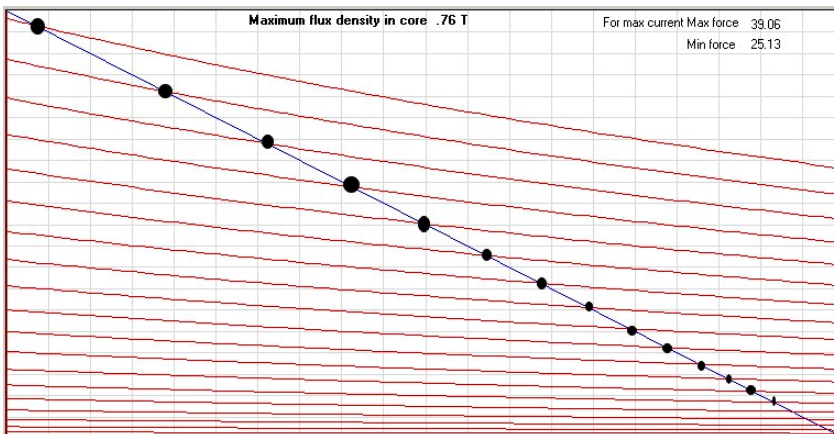
Этим, как правило, ограничивается возможность линеаризации тяговой характеристики электромагнитов традиционными методами. Если полученная характеристика не является

удовлетворительной, приходится использовать соленоид (voice – coil motor). Такой привод обладает идеально линейной тяговой характеристикой, благодаря чему используется в звуковоспроизводящей аппаратуре, устройствах позиционирования головок жестких дисков и других прецизионных преобразователях перемещений. Недостатком соленоида является гораздо меньшие, по сравнению с электромагнитом, тяговые усилия при одинаковом размере конструкции.

В нашем случае выход был найден в использовании электромагнита с регулируемым паразитным зазором. В классических конструкциях угол наклона паразитного зазора равен нулю, то есть якорь и отверстие в рамке, через которое он проходит, являются цилиндрическими. Изменяя длину паразитного воздушного зазора  $g_p$  и угол наклона паразитного зазора  $\beta$ , можно существенно улучшить линейность тяговой характеристики. Тяговое усилие при этом уменьшается, однако все равно остается выше усилия соленоида.

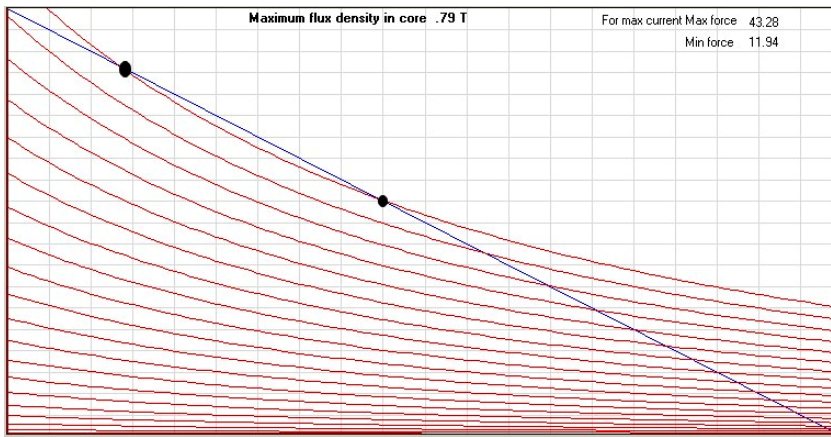


Идея заключается в том, что во время сближения якоря и ограничителя, длина паразитного зазора также должна изменяться. На последнем графике показаны тяговые характеристики электромагнита при различных токах обмотки для угла основного воздушного зазора  $40^\circ$  и паразитного  $10^\circ$ .



Теоретически, можно добиться отсутствия зависимости создаваемого электромагнитом усилия от положения якоря, однако при этом существенно возрастает количество витков обмотки и увеличивается диаметр якоря. Единственное требование при оптимизации электромагнита – тяговая характеристика должна иметь только одну точку пересечения с графиком противодействия пружинной подвески, на которой закреплен подвижный держатель образца трибометра.

Следующий график приведен для угла  $60^\circ$  рабочего зазора и  $10^\circ$  - паразитного. Устойчивое состояние якоря достигается в двух различных точках, и является неопределенным между ними.



В случае оснащения привода системой обратной связи с использованием датчиков положения, якорь электромагнитов может пройти по инерции первое устойчивое состояние, а затем совершать колебания между двумя критическими положениями. Следует заметить, что при использовании более жесткой подвески, можно устранить данную проблему. В этом случае угол наклона графика реакции пружины увеличится, и для каждого значения тока обмотки будет существовать только одно устойчивое положение якоря. Правда, полезное усилие электромагнита будет уменьшено, и привод станет менее эффективным (небольшие усилия при относительно больших габаритах).

Алгоритм расчета электромагнитов производится методом последовательных приближений:

1. Диапазон перемещений якоря делится на несколько участков;
2. Для каждого положения вычисляется длина и площадь сечения воздушных зазоров;
3. Определяется магнитное сопротивление зазоров с помощью формулы **8**;
4. По формуле **7** определяется магнитный поток;
5. Определяется плотность потока в якоре по формуле **6**;
6. Если плотность потока превышает  $B_c=0.8$  Тесла, значение потока  $\Phi$  уменьшается в соответствии с диаграммой намагничивания материала якоря;
7. Рабочее усилие определяется с помощью формулы **1**;
8. Данные отображаются на графике, ток в обмотке увеличивается, и вычисления повторяются сначала.