МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ.

Н. Н. Малов, Москва.

Еще в 1847 г. Джаульь[1] обнаружил, что под действием постоянного магнитного поля, направленного по оси ферромагнитного стержня, размеры последнего изменяются. Явление это, получившее название магнитострикции, было в дальнейшем подробно изучено в постоянных магнитных полях.

Естественно предположить, что под влиянием периодически-меняющегося во времени магнитного поля ферромагнитный стержень должен периодически изменять свои размеры. Таким образом, возможно получение механических колебаний вполне определенной частоты.

Если имеется прямой стержень, длины l *см*, закрепленный посредине или висящий свободно, то частота ν его собственных продольных колебаний определяется, как известно, соотношением:

$$\nu_n = \frac{v}{2l} n \qquad (n = 1,\ 2,\ 3,\ 4 \ldots), \tag{1}$$

где v — скорость распространения колебаний в стержне, n — номер обертона.

Так как величина магнитострикции не зависит от знака поля, то частота магнитострикционных колебаний стержня должна вдвое превышать частоту магнитного поля; если

---

[1] Joule. Phil. Mag., *30*, 76, 1847.

же стержень намагничен достаточно сильно, этого удвоения частоты, очевидно, происходить не должно.

Амплитуда магнитострикционных колебаний, вообще говоря, незначительна (относительное удлинение является величиной порядка $10^{-7}-10^{-6}$).

Однако, в случае „магнитострикционного резонанса", т. е. возбуждения стержня на одной из его собственных частот, нужно ожидать значительного увеличения амплитуды его колебаний.

Естественно ожидать, что „резонанс" может вызываться как основной частотой магнитного поля, так и его обертонами; в свою очередь, стержень может резонировать различными обертонами собственных колебаний; поэтому представляется интересным детально изучить возможность возбуждения резонансных ферромагнитных колебаний.

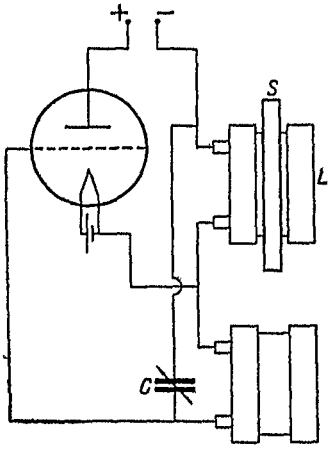

Рис. 1.

Для получения магнитострикционных колебаний ферромагнитный стержень S помещается [1] в катушку колебательного контура L (рис. 1), включенную таким образом, что по ней проходила, кроме колебательного тока, также и постоянная составляющая анодного тока, создававшая постоянное намагничение стержня (это делается потому, что, как показал опыт подмагниченный стержень дает более интенсивные колебания).

Непрерывным вращением конденсатора C можно было плавно изменять частоту электромагнитных колебаний, наблюдая при этом возникновение резонансных колебаний стержня. Эти резонансные колебания, амплитуда которых значительно превышает амплитуду обыкновенных коле-

[1] Н. Н. Малов, В. К. Митяев и С. Н. Ржевкин. Механические колебания ферромагнитных стержней. Сборник, посвященный 10-летию Московской магнитной лаборатории (печатается).

баний, могут отмечаться различными способами, как например:

1) Если стержень посыпать песком, то, при достаточно сильном возбуждении, в момент резонанса песок сбрасывается со стержня, оставаясь только в узловых точках, благодаря чему можно одновременно исследовать распределение амплитуд колебаний вдоль стержня (напр., при возбуждении основной частоты свободного или закрепленного посредине стержня песок собирается в средней части его и полностью сбрасывается с концов и т. д.). 2) При работе в области звуковых частот стержень, колеблющийся в резонансе, издает сильный звук, резко выделяющийся на фоне звучания генератора. 3) Возможно объективное определение наличия резонансных магнитострикционных колебаний, осуществляемое следующим образом: между боковой

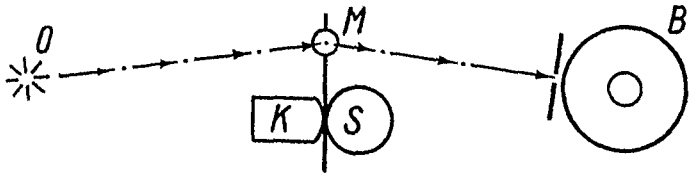

Рис. 2.

поверхностью одного из концов стержня (закрепленного посредине) S и резиновым и пробочным валиком K слегка зажимается (рис. 2) ось R, несущая легкое зеркальце M; при колебаниях стержня (очевидно, происходящих в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа), ось вместе с зеркальцем приходит в движение, которое регистрируется при помощи луча света источника O, отражающегося зеркальцем на вращающийся барабан B со светочувствительной бумагой. При медленном вращении барабана и одновременном изменении частоты колебаний генератора, на бумаге записывается прямая линия, имеющая в некоторых местах резкие утолщения, соответствующие резонансным колебаниям стержня (рис. 3). Если производить подобную запись в то время, когда стержень колеблется в резонансе, сообщив при этом барабану достаточно быстрое

вращение, то на бумаге получается зигзагообразная кривая колебаний. Зная скорость вращения барабана и измеряя расстояние между соседними зигзагами, можно определить частоту записанных колебаний. По амплитуде записанной кривой, диаметру оси и расстоянию от зеркальца до барабана можно подсчитать амплитуду колебаний стержня.

Оказалось, что при возбуждении основного тона (3850 *кол/сек*) стержня из стали-серебрянки диаметром 7,5 *мм* и длиной — 653 *мм* (сила переменного поля $M = 100$ *гаусс*), амплитуда колебаний на конце стержня достигает 0,007 *мм*, так что относительное удлинение составляет $20 \cdot 10^{-6}$ всей

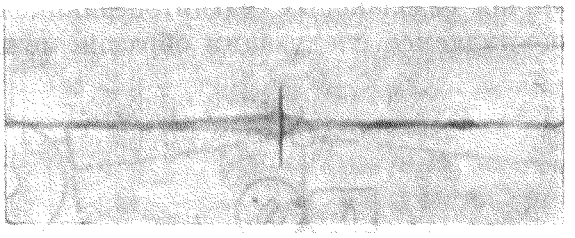

Рис. 3.

длины, т. е. в 10^{-20} раз превышает удлинение, возникающее при отсутствии резонанса.

Детальное изучение ряда стержней показало, что возникновение резонансных колебаний возможно во всех случаях, когда частота магнитного поля f и собственная частота колебаний стержня ν связаны соотношением:

$$kf = n\nu \qquad \begin{pmatrix} k = 1, 2, 3 \ldots \\ n = 1, 2, 3 \ldots \end{pmatrix}, \tag{2}$$

т. е., что возможно возбуждение основного тона стержня или одного из его обертонов под действием основной частоты магнитного поля или одной из ее высших гармоник (см. табл. 1 и 2).

ТАБЛИЦА 1.

Сталь-серебрянка, диам. 7,5 *мм*, длина 653 *мм* $\nu_1 = 3850$ *кол/сек.*

Частоты поля, вызывающие резонансн. колебания	$k:n$
1925	2:1
2895	4:3
3850	1:1
5770	2:3
7700	1:2
11550	1:3
15400	1:4
19250	1:5

ТАБЛИЦА 2.

Сталь-серебрянка, диам. 7,5 *мм*, длина 340 *мм* $\nu_1 = 7470$ *кол/сек.*

Частоты поля, вызывающие резонансные колебания	$k:n$
	8:1
934	7:1
1067	5:1
1494	4:1
1868	3:1
2490	2:1
3735	1:1
7470	1:2
14940	

Наиболее сильные резонансные колебания получаются при $f = \nu$ и $f = \nu/_2$, т. е. при возбуждении основного тона стержня 1-й и 2-й гармониками магнитного поля; колебания ослабляются с увеличением n; возбуждение высших обертонов стержня оказывается очень слабым.

Получение мощных звуков низкой частоты (несколько тысяч *кол/сек*) при помощи магнитострикционных стержней оказывается возможным. При переходе же к частотам, лежащим на пределе слуха (около 20 000 *кол/сек*), тепловое действие токов Фуко, возбуждаемых в стержне, делается настолько значительным, что приходится пользоваться только слабыми магнитными полями (в несколько гаусс), дающими не очень интенсивные колебания.

Однако, даже эти слабые звуки представляют большой интерес, благодаря своей строго определенной частоте.

При выключении генератора стержень, стрикцирующий в резонансе, продолжает некоторое время колебаться с уменьшающейся амплитудой; это явление может служить для определения декремента затухания различных ферромагнитных материалов.

Изучая магнитострикционные колебания, Пирс[1] обнаружил, что стрикцирующий стержень, подобно пьезокварцевому кристаллу, способен оказывать стабилизирующее действие на частоту генератора, в катушке которого он находится.

[1] W. Pirce. Proceed. Amer. Acad. of Arts and Sciences, *63*, 1, 1928.

Простейшая схема подобного генератора изображена на рис. 4; катушки L_1 и L_2 наматываются таким образом, чтобы поле, создаваемое ими, было одного направления. Стержень R имеет посредине закрепленную точку, но не касается внутренности катушек, а висит в них свободно. При большом различии в периодах контура и стержня колебания отсутствуют. Меняя настройку контура вращением конденсатора C, можно настолько сблизить эти периоды, что генерация внезапно возникнет, что будет заметно по звуку, который начнет издаваться стержнем (если мы работаем в области звуковых частот), а также по резкому возрастанию величины анодного тока, отмечаемого амперметром A. При дальнейшем изменении емкости ток постепенно будет спадать до нормальной величины, а частота колебаний в это время будет оставаться неизменной, пока резонансные колебания не прекратятся. В этом случае стержень является возбудителем колебаний. Можно также пользоваться обычной генераторной схемой, помещая в катушки контура стержень, который будет стабилизировать колебания при совпадении периодов. При большом различии периодов генератор продолжит генерацию, но она не будет стабильной. Необходимо отметить, что стабилизация сохраняется независимо от того, подходить ли к собственной частоте стержня со стороны более низких или более высоких частот. На рис. 5 приводятся кривые, характеризующие процесс стабилизации. По оси абсцисс отложена величина емкости C (в делениях головки конденсатора); кривые $ABCD'E$ и $EDCB'A$ дают зависимость от емкости длины волны λ генератора, при чем стрелки указывают направление изменения

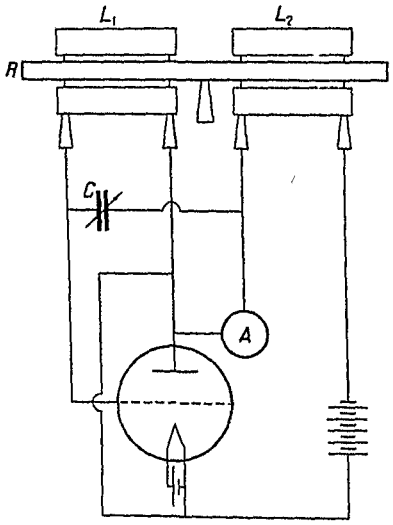

Рис. 4.

емкости. Из этих кривых видно, что после возникновения колебаний стержня длина волны генератора остается, несмотря на изменение емкости, неизменной, а затем скачком меняется. Кривая *ABCDE* изображает зависимость λ от *C* при демпфировании стержня (демпфирование достигается, например, зажатием конца стержня в руке).

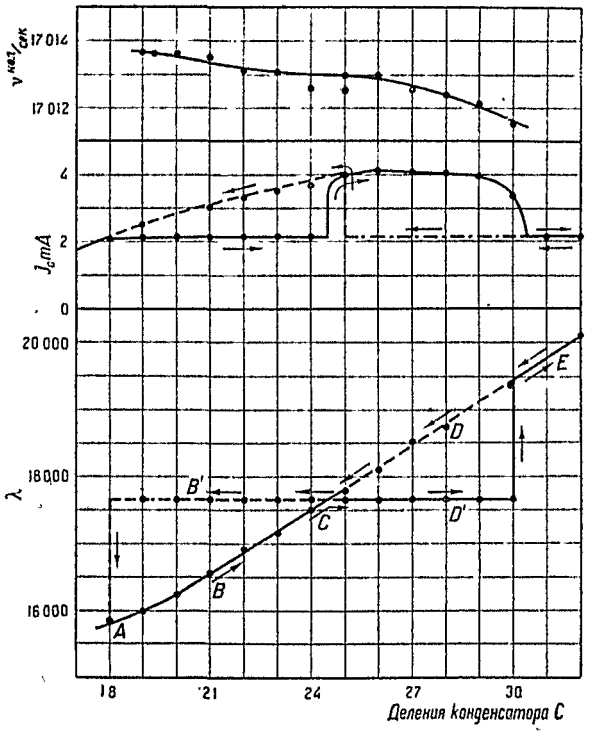

Рис. 5.

Средняя кривая изображает изменения анодного тока при стабилизационном процессе, а верхняя — точно измеренную (методом биений) частоту колебаний генератора (она сохраняет постоянство с точностью до 0,01%).

В виду громадной важности сделанного открытия, Пирс исследовал целый ряд ферромагнитных материалов, при чем нашел, что стержни из чистого или углеродистого железа мало пригодны для стабилизации, благодаря слабой стрикцирующей способности. Никкель, у которого коэффициент

стрикции довольно велик, обладает, однако, малой стабилизирующей способностью. Нихромовые сплавы и инвар (36% Fe + 64% Ni) оказываются наиболее применимыми.

При изменениях анодного вольтажа и накала или смене ламп изменение стабилизированной частоты не превышало 0,03%.

Пьезокварцевый стабилизатор поддерживает (при неизменных условиях генерации) постоянство частоты с точностью до 1/500%; если же менять потенциалы анодной и накальной цепей или сменить лампу, колебания стабилизированной частоты достигают 0,07%, т. е. качество стабилизации стержня и кварца почти одинаково.

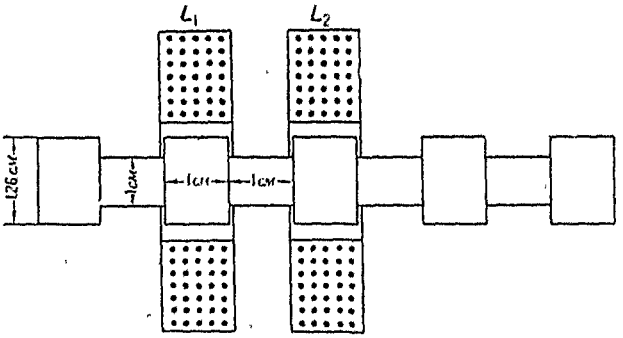

Рис. 6.

Однако, пьезокварц обладает ничтожным температурным коэффициентом частоты (относительным изменением частоты при вариации температуры на 1° С), составляющим от 1/200 до 1/1000%; определение же температурного коэффициента нихромовых стержней показало, что он достигает 1/93%. Для уменьшения температурного коэффициента частоты Пирс сконструировал сложный вибратор, состоящий из никкелевой трубки (обладает отрицательным температурным коэффициентом частоты), наполненной инваром (с положительным температурным коэффициентом частоты). Такой сложный вибратор давал изменения частоты, не превосходящие 1/500%, т. е. приближался по постоянству к кварцевому стабилизатору.

Получение очень низких стабилизированных частот при помощи магнитострикцирующих стержней не представляет затруднений; практически ими удобно пользоваться до частот порядка 2000—2500 *кол/сек* (при этом длина стержня будет составлять приблизительно 110—90 *см*, если принять в расчет скорость звука = 4500 *м/сек*, как среднее между скоростью в инваре — 4160 *м/сек* и нихроме — 4980 *м/сек*).

Применяя сложный вибратор, состоящий из никкелевой трубки, заполненной свинцом, Пирс получил 1000 *кол/сек* при длине вибратора в 94,5 *см*.

Колебания с частотой до 100 000 (длина стержня в последнем случае близка к 2 *см*) получаются очень легко путем применения стержней различной длины.

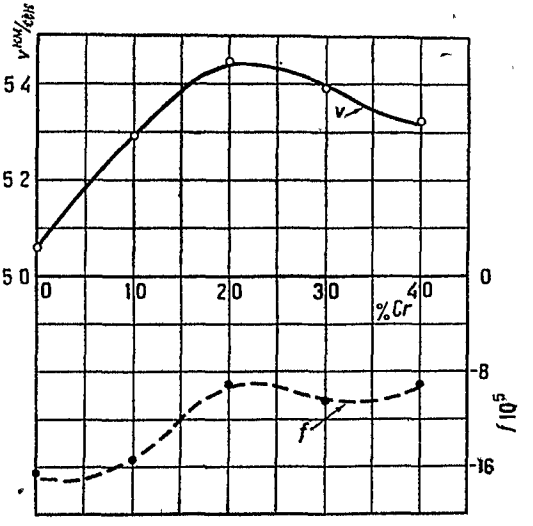

Рис. 7.

Дальнейшее укорочение стержней затрудняет закрепление его и установку в катушках.

Применяя стержень сложной формы, сделанный из высокосортной стали и выточенный, как это указано на рис. 6, при чем в катушки попадали два соседние выступа, Пирс получил 295,480 *кол/сек*.

Конструирование сложных вибраторов представляет известные трудности; что же касается простых прямых стержней, то они легко могут быть нарезаны в любой лаборатории, и проблема стабилизации колебаний с частотой от нескольких тысяч до 100 000 *кол/сек* разрешается очень просто и экономично. Применение же кварца для стабилизации столь низких частот очень затруднительно и требует больших расходов, так как размеры пластинок должны быть весьма значительны.

В работе Пирса приводятся результаты применения магнитострикционного генератора для измерения частоты колебаний, градуировки волномера и т. д. Методика совершенно аналогична методике применения пьезоэлектрических генераторов, результаты получаются столь же хорошими.

В настоящее время производство магнитострикционных генераторов уже поставлено за границей в заводском масштабе.

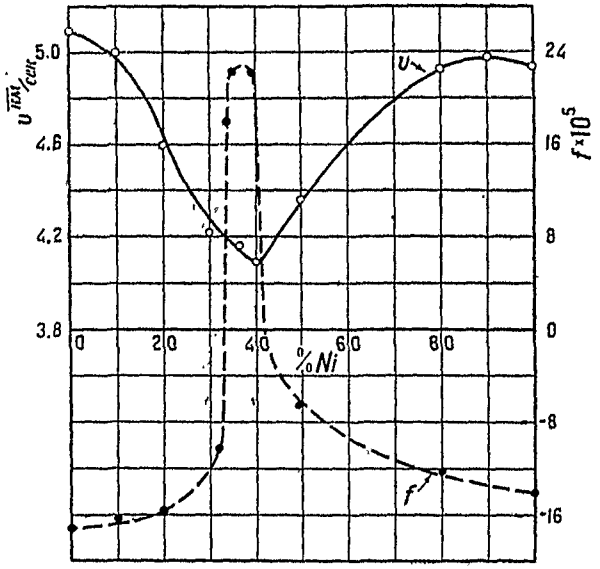

Рис. 8.

Измеряя собственную частоту магнитострикционных колебаний, можно определить скорость звука и модуль Юнга для различных ферромагнитных материалов, а также и их зависимость от состава сплава и температуры. Определение модуля Юнга E представляет значительный интерес, так как оно производится при гораздо меньших растяжениях стержня, чем те, которые приходится создавать при обычном определений модуля Юнга.

На рис. 7 изображен ход скорости звука V и ее температурного коэффициента f: $\frac{\Delta V}{\Delta T^{\circ}}$ в зависимости от процент-

ного содержания хрома в сплаве *Fe — Cr*. Рис. 8 представляет те же величины в сплаве *Fe — Cr*.

Эти исследования привели Пирса к выводу, что в бинарных металлических сплавах экстремальные значения скорости звука и ее температурного коэффициента получаются одновременно.

Зависимость модуля Юнга *E* и его температурного ко-

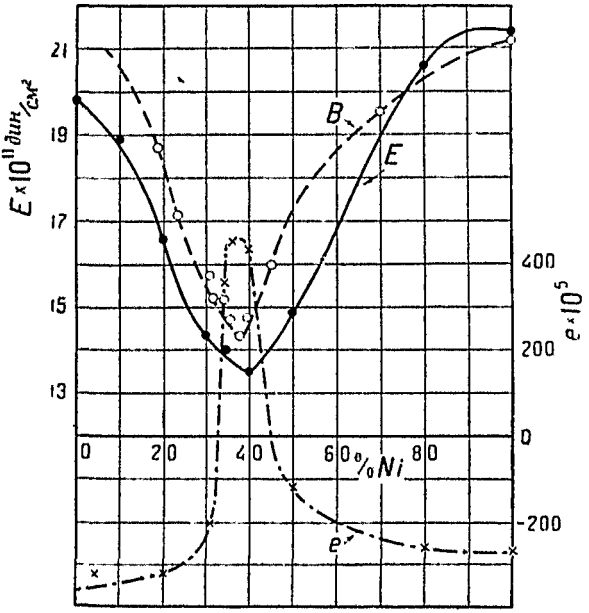

Рис. 9.

эффициента *e*: $\frac{\Delta E}{E T^0}$ в зависимости от содержания никкеля в сплаве *Fe — Ni* приводится на рис. 9.

Кривая *E* дает результаты, полученные Пирсом, а кривая *B* — величины модуля Юнга по данным Bureau of Standarts, полученным обычным методом. Различие в абсолютных значениях может быть объяснено различной величиной растяжений стержня, но не исключена возможность отнести эти изменения за счет различной термической обработки или влияния примеси 0,3% марганца.

Вышеприведенные результаты показывают, сколь широкое научное и техническое применение могут найти магнито-стрикционные колебания, которым до последнего времени исследователи не уделяли должного внимания.

Теоретическое обоснование магнитострикционных колебаний можно найти в упомянутой работе Пирса и в статье Блэка.[1]

[1] K. Ch. Black. Proceed. Amer. Acad. *63*, 49, 1928. Со времени сдачи этой статьи в печати появился еще ряд исследований стрикционных колебаний; см. Фридман, Телегр. и Телефония без пров. № 3, 1929.

Ответственные редакторы: *П. П. Лазарев и Э. В. Шпольский.*

Ленинградский Областлит № 51670. II. 21. Гиз. № 36548/М. Тираж 2400.

Типография им. Бухарина, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.