

А. Н. Неверов

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), г. Москва, 125164, Ленинградский пр., 64; e-mail: neverov_an@mail.ru

Экспериментальное исследование электромагнитного соединения волноводов в стержневых колебательных системах

Получена 30.09.2014, опубликована 08.11.2014

Проведено экспериментальное исследование электромагнитного соединения волноводов. Показано, что акустический контакт в значительной степени определяет свойства составной колебательной системы. В частности, акустический контакт может быть генератором высших гармоник. Определена экспериментальная зависимость эквивалентной податливости акустического контакта от входного сигнала и тока соленоида при электромагнитном соединении волноводов.

Ключевые слова: акустический контакт, электромагнитное соединение, ультразвуковая колебательная система, высшие гармоники.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное соединение волноводов было предложено И. И. Теуминым [1-3]. На рис. 1 схематически показана такая конструкция [1]. Часть системы, составленная из соединяемых друг с другом ферромагнитных стержней *I* и *II*, находится внутри обмотки *K*, через которую проходит постоянный ток. Возникающее магнитное поле втягивает стержни в соленоид, при этом создается взаимное притяжение стержней, обеспечивающее необходимый акустический контакт между ними.

При пропускании по обмотке соленоида постоянного тока оба стержня втягиваются в него с постоянной силой $F_{\text{втяг}}$, определяемой известным соотношением электродинамики:

$$F_{\text{втяг}} = \frac{1}{2\mu_0} \int_S B^2 dS, \quad (1)$$

где B – индукция в стержне (в плоскости скрепления), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, S – площадь поперечного сечения стержня.

В литературе приводятся практические формулы для определения силы притяжения стержней:

$$F_{\text{пр}} = 12,76 B^2 r^2 \cdot 10^{-2},$$

где сила притяжения $F_{\text{пр}}$ измеряется в кГс, радиус стержней r в см, а индукция магнитного поля в стержнях B – в килогауссах [1].

В формуле [2]

$$F_{\text{пр}} = 0,64 \cdot 10^{-8} \frac{L_c^2 I^2}{r_1 r_2}$$

$F_{\text{пр}}$ измеряется в ньютонах, радиусы контактирующих стержней r_1 и r_2 в м, $L_c = L_c(I)$ индуктивность соленоида в генри.

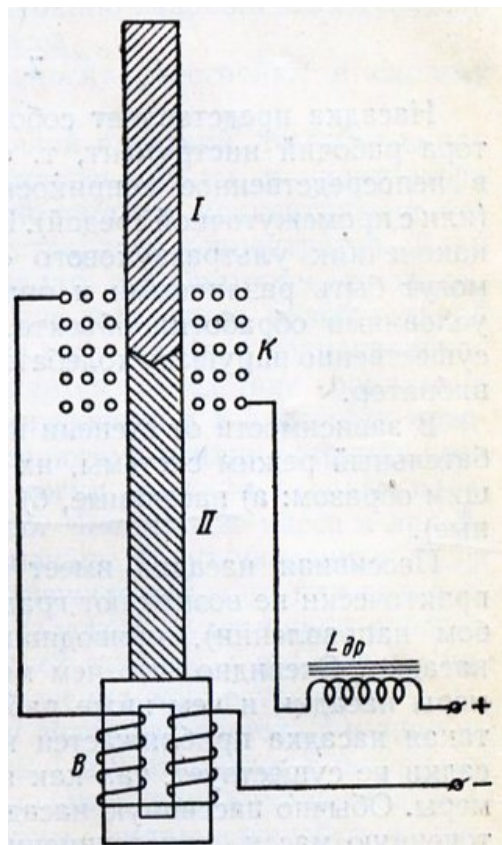


Рис. 1. Схема электромагнитного соединения волноводов

дресселем I_{dp} (рис. 1). При выключении подмагничивания скрепление разъединяется [2].

Втягиваясь в соленоид, преобразователи сжимаются и контактируют своими торцами. Поскольку продольный размер области акустического контакта много меньше длины волны, он может считаться плоским. Свойства этой плоскости очень сильно зависят от усилия сжатия преобразователей (т.е. от тока в обмотке соленоида), поэтому свойства полученной при сжатии составной колебательной системы (собственные частоты, коэффициенты передачи и др.) также должны зависеть от величины усилия сжатия преобразователей.

Так как зависимость между силой, действующей в сечении акустического контакта, и его деформацией нелинейна, в составной системе, наряду с колебаниями частоты возбуждения преобразователя – источника, появляются генерируемые акустическим контактом колебания высших частот [4]. Эти колебания легко наблюдать, если их частоты близки к одной из собственных частот составной системы.

Электромагнитное скрепление является очень удобным в тех случаях, когда надо часто и быстро сменять звено (например, стержень с рабочим инструментом). Величина силы притяжения, обеспечивающая достаточную прочность скрепления, должна быть $F_{\text{пр}} \geq (0,1 \dots 0,2) F_m'$, где F_m' – амплитуда колебательной силы в узле смещения стержня. При этом имеется в виду, что такое соединение осуществляется (как и все соединения) в плоскости пучности смещения. Электромагнитное соединение удобно применять при передаваемых мощностях до 0,5...1,0 кВт. При более высоких значениях мощности электромагнитное устройство может оказаться несколько громоздким.

Практически удобно (в случае применения магнитострикционного вибратора) в качестве намагничивающего тока использовать ток подмагничивания вибратора B , включая обмотку K последовательно с блокировочным

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная проверка полученных соотношений проводилась на электромагнитном соединении волноводов, поскольку предположения, при которых проводились вычисления, выполняются в максимальной степени. Блок-схема нашей экспериментальной установки приведена на рис. 2.

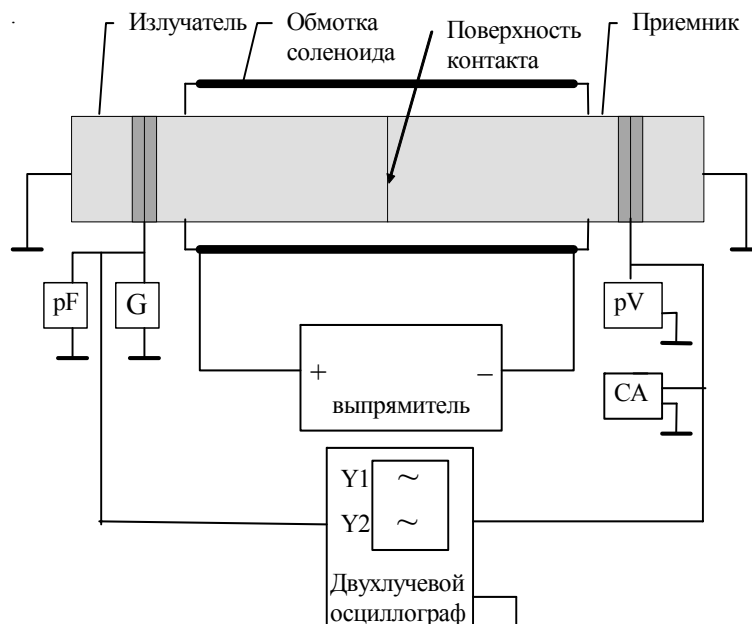


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки для исследования электромагнитного соединения

Исследуемая колебательная система представляла собой два идентичных пакетных пьезопреобразователя, один из которых использовался как источник продольных упругих колебаний, а другой — в качестве их приемника. Конструкция преобразователей подбиралась таким образом, чтобы они при расчете могли аппроксимироваться однородными стержнями. Частотопонижающие накладки преобразователей изготавливались из ферромагнитного материала — стали. Характеристические сопротивления преобразователей были равны. Собственные частоты преобразователей составляли $22,60 \pm 0,05$ кГц. Преобразователи подвешивались на длинных тонких нитях и помещались в соленоид. Преобразователь-источник возбуждался гармоническим сигналом от генератора звуковой частоты G. Частота возбуждающего сигнала определялась при помощи частотомера pF.

Амплитуды гармоник определялись по показаниям анализатора спектра. Формы входного и выходного сигналов фиксировались на экране двухлучевого осциллографа. Для наблюдения сигнала n -ой гармоники колебательная система возбуждалась напряжением частоты приблизительно в n раз меньшей собственной частоты системы (субгармонические частоты), тогда сигнал n -ой гармоники усиливался вследствие резонанса.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Нам удалось наблюдать при субгармоническом возбуждении 2, 3, 5, 7 и 9 гармоник. На рис. 3 приведены осциллограммы 2, 3 и 5 гармоник при различных условиях.

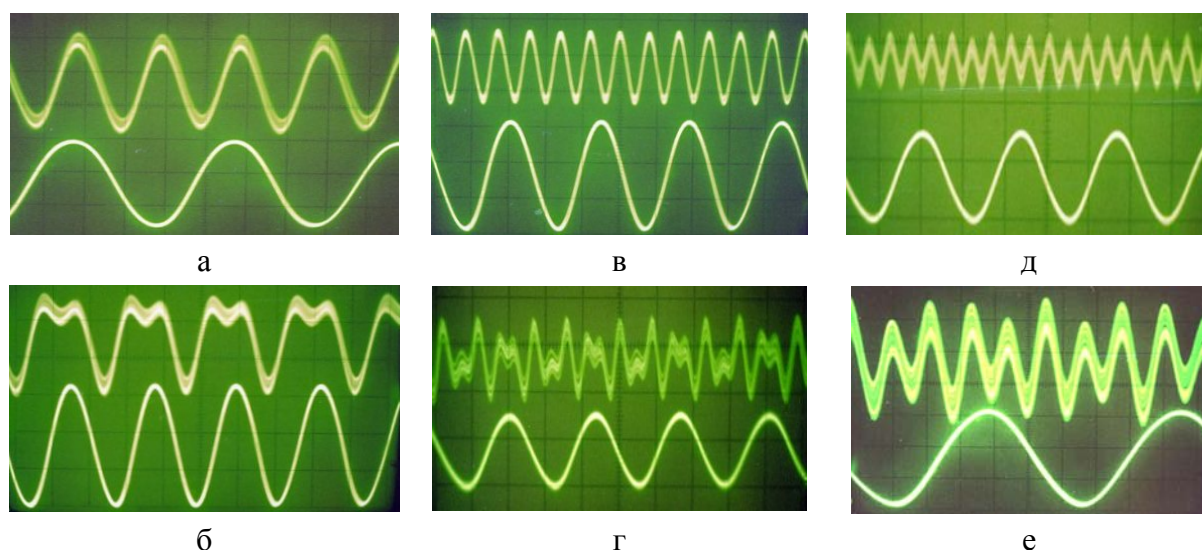


Рис. 3. Осциллограммы высших гармоник при различных условиях; а, б – 2-я, в, г – 3-я, д, е – 5-я гармоник; а, в, д – $U_{вх}=50$ В, $I=0,5$ А; б, г, е – $U_{вх}=10$ В, $I=2$ А. В нижней части осциллограмм – возбуждающее электрическое напряжение (основная частота)

При малых токах и большом входном напряжении на осциллограмме фиксируется только сигнал высшей гармоники (рис. 3 а, в, д), при увеличении тока и уменьшении входного напряжения увеличивается сигнал основной частоты, амплитуды гармоник растут значительно медленнее (рис. 3 б, г, е).

2.1. Амплитудно-частотные характеристики

В первом эксперименте снимались амплитудно-частотные характеристики системы при постоянных входном электрическом напряжении и токе соленоида. По этим характеристикам определялись резонансные частоты системы и амплитуды выходного сигнала системы на этих частотах, а также вычислялись эквивалентные добротности. На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости резонансной частоты системы (а) и эквивалентной податливости акустического контакта (б) от тока соленоида на первой (основной) гармонике.

Разброс результатов в этом и последующих экспериментах не превышал 15%.

Эквивалентная податливость C определялась из условия резонанса колебательной системы, состоявшей из двух стержней, соединенных сосредоточенной податливостью:

$$w_1 \operatorname{tg} k_1 l_1 + w_2 \operatorname{tg} k_2 l_2 - \omega C w_1 w_2 \operatorname{tg} k_1 l_1 \operatorname{tg} k_2 l_2 = 0,$$

где $w_{1,2} = \rho_{1,2} c_{1,2} S_{1,2}$, $\rho_{1,2}$, $c_{1,2}$ и $S_{1,2}$ – плотность, скорость звука и площадь поперечного сечения стержней, $l_{1,2}$ – их длина, $k_{1,2} = \omega/c_{1,2}$ – волновое число, ω – циклическая частота, индексы 1 и 2 относятся к первому и второму стержням соответственно.

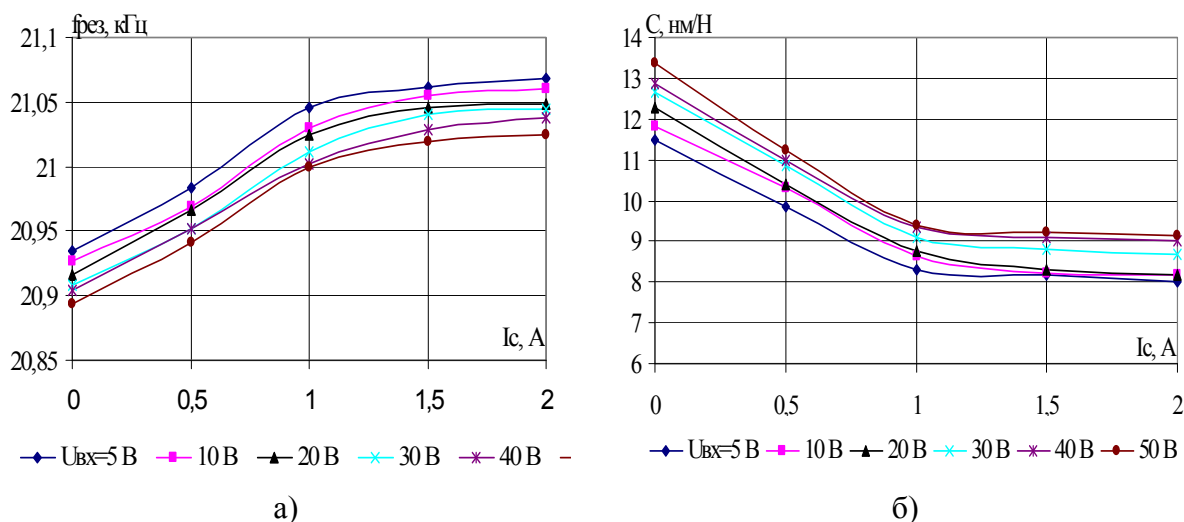


Рис. 4. Зависимости резонансной частоты составной системы (а) и податливости акустического контакта (б) от тока соленоида и входного электрического сигнала на первой гармонике

Резонансная частота при увеличении усилия стягивания (тока соленоида) растет, а податливость акустического контакта падает, что подтверждают результаты работы [4]. При повышении возбуждающего сигнала (входного напряжения) резонансная частота системы падает, а податливость акустического контакта растет.

На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости выходного сигнала при резонансе от входного сигнала (а) и тока соленоида (б) на первой гармонике.

Выходное напряжение практически линейно зависит от входного. С ростом тока соленоида (т.е. усилия стягивания стержней) до 1–1,5 А выходной сигнал растет, а затем выходит на насыщение. Можно, по-видимому, предположить, что при дальнейшем повышении тока выходной сигнал будет снижаться.

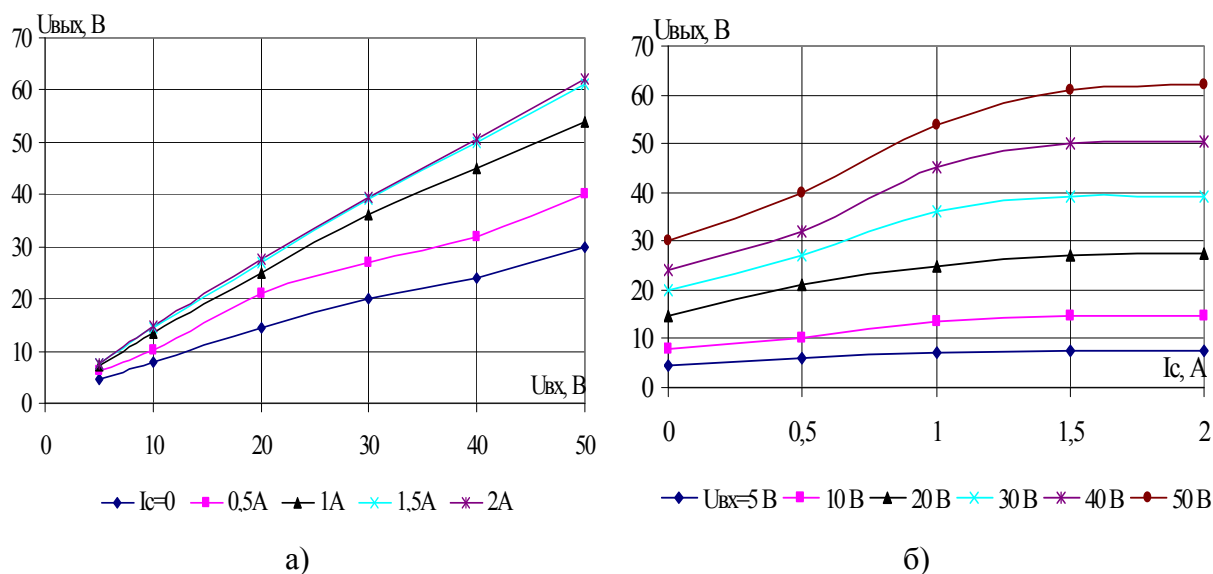


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала при резонансе от входного сигнала (а) и тока соленоида (б) на первой гармонике входного сигнала

На рис. 6–8 приведены экспериментальные зависимости амплитуд второй, третьей и пятой гармоник соответственно от амплитуды входного электрического сигнала.

Резонансные частоты составной системы при изменении тока соленоида и входного напряжения не выходили за пределы полосы пропускания.

Согласно [4] сигнал n -ой гармоники должен быть пропорционален n -ой степени сигнала 1-ой гармоники (которая пропорциональна входному сигналу, см. рис. 5а). В наших экспериментах сигналы второй и третьей гармоник зависят от входного приблизительно по квадратичному и кубическому закону соответственно. Зависимость же сигнала пятой гармоники от входного сигнала не соответствует теоретическим результатам.

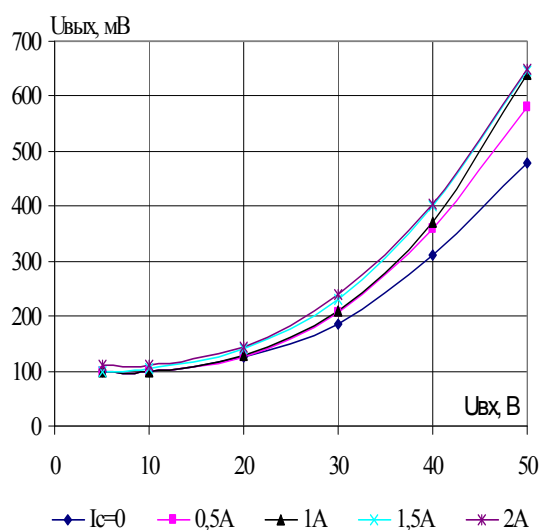


Рис. 6.
Экспериментальные зависимости амплитуд второй гармоники от амплитуды входного электрического сигнала при различных токах соленоида

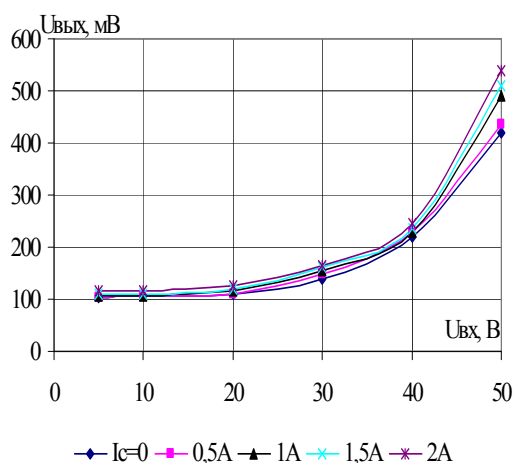


Рис. 7.
Экспериментальные зависимости амплитуд третьей гармоники от амплитуды входного электрического сигнала при различных токах соленоида

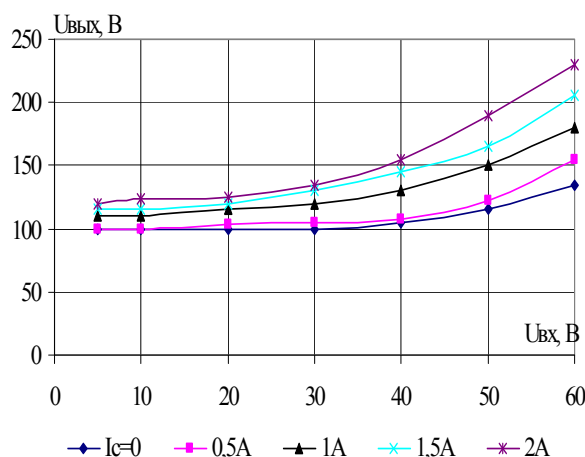


Рис. 8.
Экспериментальные зависимости амплитуд пятой гармоники от амплитуды входного электрического сигнала при различных токах соленоида

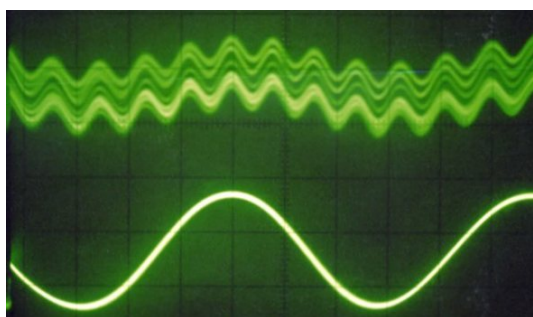


Рис. 9. Осциллограмма сигнала седьмой гармоники

Следует отметить anomальное увеличение амплитуды выходного сигнала на второй и третьей гармониках при амплитудах входного сигнала больше 40 В. Величина выходного сигнала при этом была очень неустойчива, отмечался характерный дребезжащий звук. Это может быть объяснено полным раскрытием акустического контакта при соответствующих условиях.

Кроме того, мы наблюдали сигнал седьмой гармоники на частоте входного сигнала 3,14 кГц порядка 7 мВ (рис. 9) при входном сигнале приблизительно 100 В и сигнал девятой гармоники на частоте 2,45 кГц порядка 2 мВ при входном сигнале приблизительно 100 В.

2.2. Управление свойствами составной системы изменением тока в соленоиде

Во втором эксперименте изучались зависимости выходного сигнала от тока в соленоиде при постоянных параметрах возбуждающего сигнала – амплитуде и частоте. Результаты приводятся на графиках рис. 10 – 13.

Зависимости, приведенные на рис. 4а и 10, показывают возможность управления свойствами составной ультразвуковой колебательной системы изменением тока соленоида. Действительно, при возбуждении нескольких преобразователей от одного генератора в определенном диапазоне (рис. 4а) возможна подстройка резонансной частоты отдельных преобразователей на рабочую частоту генератора. Если же для нормального протекания технологического процесса необходимы колебания определенной амплитуды, подстройка также может быть осуществлена изменением тока соленоида (рис. 10).

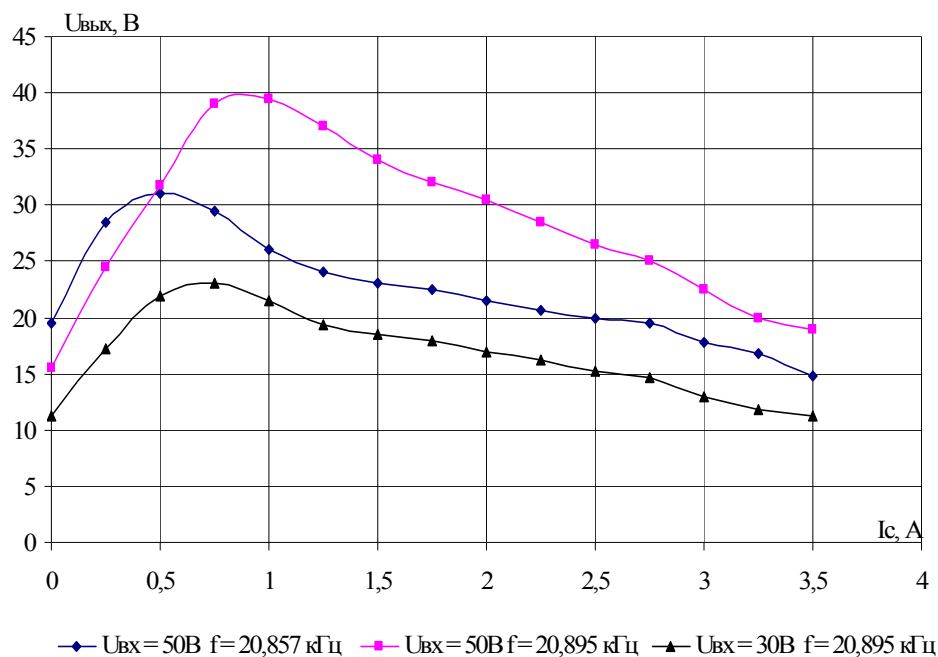


Рис. 10. Зависимость выходного сигнала от тока в соленоиде на первой гармонике

На первой и второй гармониках (рис. 10 и 11) наблюдается максимум выходного сигнала при некотором значении тока в соленоиде (т.е. статической стягивающей силе); для сигналов третьей и пятой гармоник (рис. 12 и 13) максимум выходного сигнала нами не наблюдался. Возможно, мы не дошли до него (он был при больших значениях тока в соленоиде, чем позволяла наша экспериментальная установка).

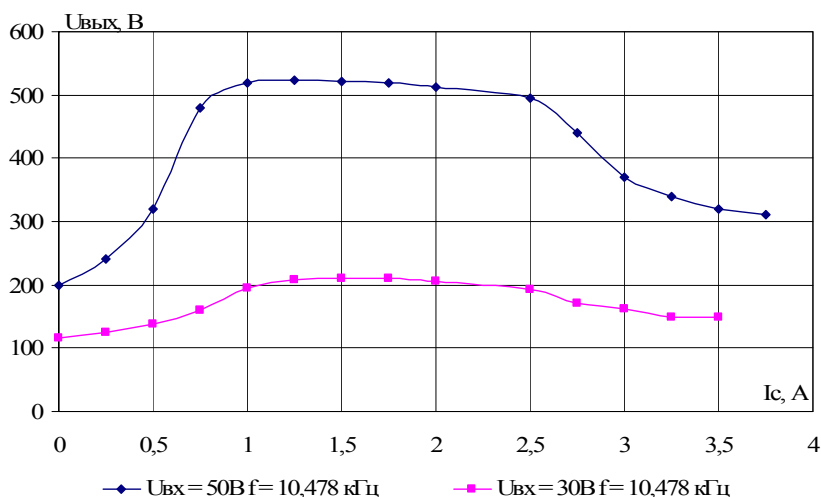


Рис. 11. Зависимость выходного сигнала от тока в соленоиде на второй гармонике

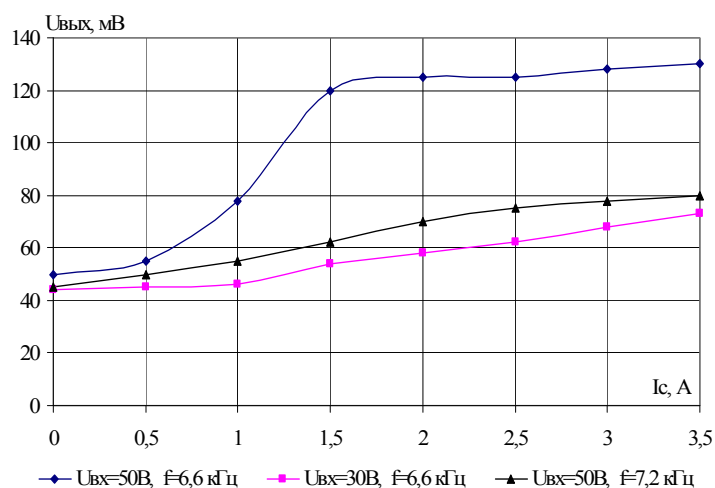
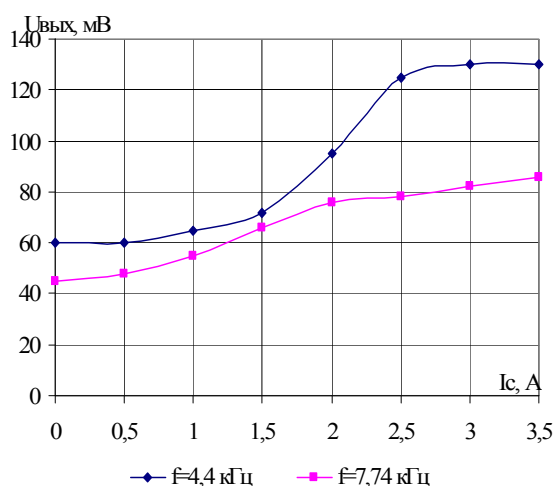


Рис. 12. Зависимость выходного сигнала в мВ от тока в соленоиде на третьей гармонике

Рис. 13.
Зависимость выходного сигнала от
тока в соленоиде на пятой гармонике,
Uвх=50 В

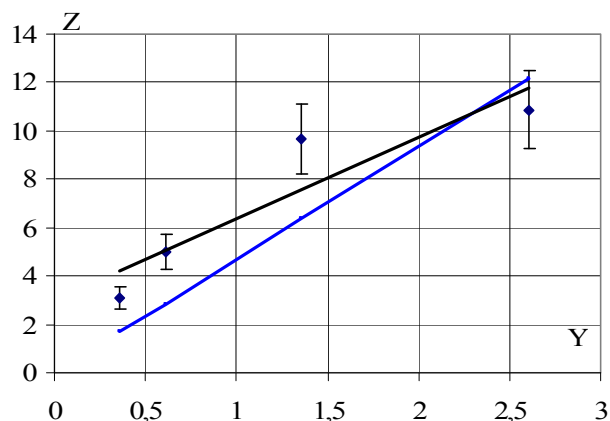
ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [4] получено выражение для амплитуды n -ой гармоники:

$$F_n = \frac{\Gamma(\nu+1)}{2^{n-1}(\nu+1)^{n-1}\Gamma(n+1)\Gamma(\nu-n)} \left(\frac{F_1}{P_0}\right)^{n-1} F_1 = \frac{1}{B(n+1, \nu-n)} \left(\frac{F_1}{2(\nu+1)P_0}\right)^{n-1} F_1, \quad (2)$$

где F_1 – амплитуда первой гармоники, P_0 – статическое усилие стягивания волноводов, $B(n+1, \nu-n)$ – бета-функция, $\Gamma(n+1), \Gamma(\nu-n), \Gamma(\nu+1)$ – гамма-функции от соответствующих аргументов.

Очевидно, F_1 пропорциональна сигналу первой гармоники U_1 , а F_n – сигналу n -ой гармоники U_n . Статическое усилие стягивания P_0 можно считать равным, по-видимому $\alpha + \beta I^2$, где α определяется стягиванием волноводов при нулевом токе, например, из-за магнитного гистерезиса в материале волноводов или особенностей их подвески. Величину β мы считаем не зависящей от тока соленоида I (сознавая, что для стальных волноводов это заведомо неверно).



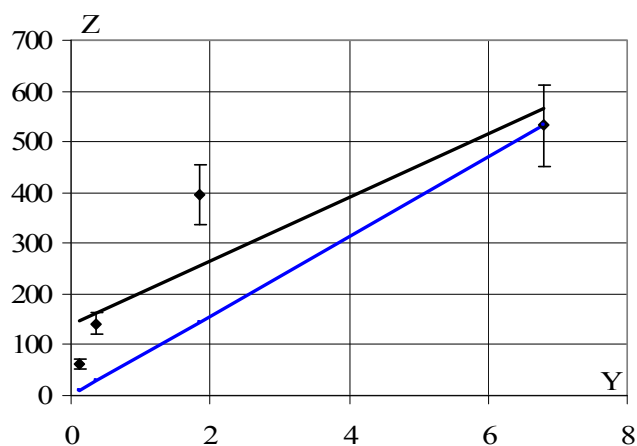
$$n = 2,$$

$$Y = \frac{\alpha}{\beta} + I^2, \text{ A}^2$$

$$Z = \frac{U_1^2}{U_n} \times 10^{-4}, \text{ B } R^2 = 0,85;$$

$$k_{\text{теор}} = 5,6;$$

$$k_{\text{эксп}} = 5,0.$$



$$n = 3,$$

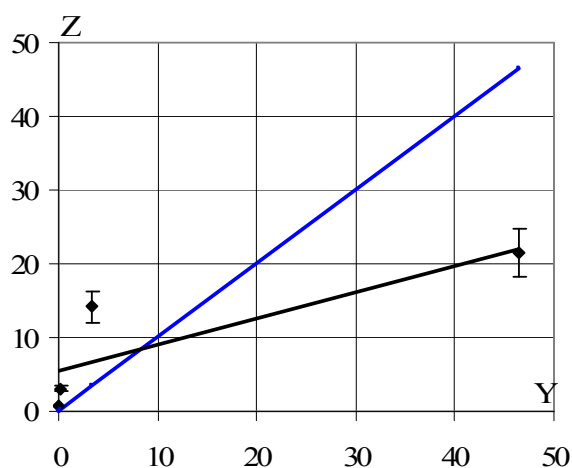
$$Y = \left(\frac{\alpha}{\beta} + I^2 \right)^2, \text{ A}^4$$

$$Z = \frac{U_1^3}{U_n} \times 10^{-3}, \text{ B}^2$$

$$R^2 = 0,80$$

$$k_{\text{теор}} = 78$$

$$k_{\text{эксп}} = 69$$



$$n = 5,$$

$$Y = \left(\frac{\alpha}{\beta} + I^2 \right)^4, \text{ A}^8$$

$$Z = \frac{U_1^5}{U_n} \times 10^{-7}, \text{ B}^4$$

$$R^2 = 0,70$$

$$k_{\text{теор}} = 1,00$$

$$k_{\text{эксп}} = 0,36$$

Рис. 14. Зависимости $Z = \frac{U_1^n}{U_n}$ от $Y = \frac{\alpha}{\beta} + I^2$ для $U_{\text{вх}}=40$ В; синим цветом выделены теоретические кривые при $\nu = 2,5$, черным – линейная аппроксимация экспериментальных данных; R^2 – достоверность линейной аппроксимации; $k_{\text{теор}}$ и $k_{\text{эксп}}$ – угловые коэффициенты теоретических и экспериментальных прямых соответственно

На рис. 14 приведены зависимости $Z = \frac{U_1^n}{U_n}$ от величины $Y = \frac{\alpha}{\beta} + I^2$, пропорциональной усилию стягивания, в степени $n - 1$ P_0^{n-1} при $U_{\text{вх}} = 30$ В для второй, третьей и пятой гармоник. Как следует из (2), эта зависимость должна быть линейной.

Для второй и третьей гармоник линейная аппроксимация экспериментальных данных вполне приемлема, на пятой гармонике, во-первых, низка достоверность линейной аппроксимации и, во-вторых, сильно отличаются угловые коэффициенты теоретической и экспериментальной прямых (1,00 и 0,36 соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электромагнитное соединение волноводов нечасто применяется на практике. Одной из причин такого состояния, видимо, является отсутствие исследований на эту тему. Нами такое соединение было выбрано потому, что в этом случае при стягивании волноводов отсутствует тангенциальное смещение контактирующих поверхностей, а, следовательно, их разрушение и изменение параметров опорной кривой.

Результаты настоящей работы подтверждают заключение теоретической статьи [4] о том, что акустический контакт в составных стержневых колебательных системах нелинеен и может быть источником высших гармоник. Подтверждена также возможность управления свойствами составной системы изменением тока соленоида.

Расхождение теоретических и экспериментальных зависимостей можно объяснить сильно нелинейной зависимостью между индукцией и напряженностью магнитного поля в соленоиде, а также тем, что при уменьшении усилия стягивания стержней резко падает добротность системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теумин, И. И. Ультразвуковые колебательные системы [Текст] / И. И. Теумин. – М.: Машгиз, 1959 – 332 с.
2. Мечетнер Б. Х. Концентраторы – инструменты для ультразвуковой обработки, способы их крепления [Текст] / Б. Х. Мечетнер – М.: НИИМАШ, 1965. – 54 с.
3. Абрамов О. В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле [Текст] / О. В. Абрамов – М.: Металлургия, 1972. – 256 с.
4. Неверов А. Н. О нелинейности акустического контакта в составных стержневых колебательных системах. [Электронный ресурс]. Техническая акустика. – Электрон. журн. – 2014, 10 – Режим доступа: <http://www.ejta.org>, свободный.