

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ НАТЯНУТОЙ В СТРУНУ

При прохождении по проводу электрического тока происходит преобразование электрической энергии в тепловую, что имеет большое практическое значение для создания ламп накаливания, нагревательных приборов и электрических печей. Однако выделение тепла в проводах и обмотках электрических машин, трансформаторов и других электротехнических устройств может привести к недопустимо высокому повышению температуры и к выходу из строя изоляции проводов и даже самих устройств.

Количество тепла, выделяющегося в проводе, пропорционально объему провода и приращению температуры, а скорость отдачи тепла в окружающее пространство пропорциональна разности температур провода и окружающей среды.

В работах [1] и [2] приводятся результаты экспериментальных исследований по нагружению медного проводника токами, существенно превышающими допустимые значения. Дана вероятностная оценка места теплового обрыва проводника натянутого между опорами. В приведенных работах питание электрической схемы осуществлялось от стабилизированного источника напряжения мощностью 1 кВт.

Дальнейшие исследования привели к созданию лабораторной установки по изучению электрофизических свойств проводниковых материалов при протекании через них переменного тока частотой 50 Гц, превышающего предельно допустимые значения. Установка состоит: из двух металлических опор, на которых жестко крепится испытуемый проводник; активной нагрузки выполненной из нихромовой проволоки, намотанной на керамический каркас; регулируемого источника переменного напряжения частотой 50 Гц; постоянного магнита.

С помощью динамометра обеспечивалось фиксированное натяжение проводника между опорами. Через проводник на нагрузку  $R_n$  подавалось переменное напряжение по схеме, представленной на рис.1.

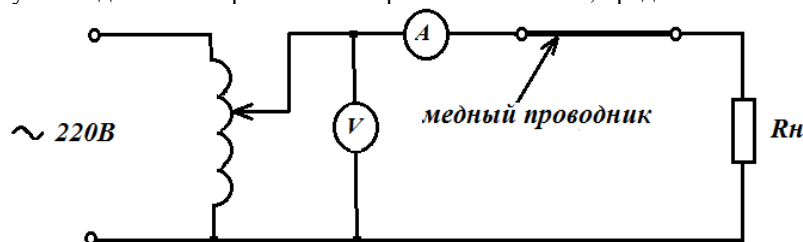


Рис.1. Электрическая схема

Для исследований применялась медная проволока диаметром 0,2 мм покрытая эмалевой изоляцией. Расстояние между опорами было выбрано 200 – 220 мм. На одну из опор крепился постоянный магнит. Величина магнитной индукции в непосредственной близости от проволоки  $\approx 60$  мТл. Проводник крепился к опорам с натяжением 5-10Н. При нагружении проводника током  $\approx 3$  А визуально наблюдались высокочастотные колебания медной проволоки.

Колебания проволоки объясняются тем, что под действием тока происходит нагрев проводника, и он удлиняется. На проводник действует сила Ампера, под действием которой проводник выталкивается из магнитного поля. При движении увеличивается скорость отдачи тепла проводником окружающему его воздуху, он охлаждается, укорачивается и стремится возвратиться в первоначальное положение, однако этому препятствует ток, под действием которого происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Температура проводника будет повышаться до тех пор, пока количество тепла, получаемое проводником, не станет равным количеству тепла, отдаваемому проводником окружающей среде. При этом в системе наступает установившееся динамическое равновесие.

Было замечено, что колебания проволоки происходят только в области упругой деформации проводника. При переходе проводника в область пластической деформации он удлиняется и колебания затухают. Таким образом, можно утверждать, что на процесс колебания медной проволоки натянутой в струну оказывают влияние электрическое, магнитное, тепловое и механическое поля.

Рассмотрим влияние на колебательный процесс постоянного магнитного поля. Если закрепить магниты на одной из опор установки или на двух опорах, как показано на рис.2а, то при возрастании тока будет наблюдаться увеличение размаха колебаний  $A$  до величины 30 мм при токе 8 А. Дальнейшее увеличение тока приводит к перегреву проводника в местах крепления его к опорам и обрыву.

Если расположить постоянные магниты так, как показано на рис.2б, то при токах меньше 5А колебание проводника будет происходить по схеме, показанной на рис.2а, однако при токе порядка 6 – 7 А происходит уменьшение амплитуды колебаний в центральной части проводника с образованием узла и пучностей. Таким образом, расположение постоянных магнитов и величина тока, протекающего через проводник, влияют на длину волны колебаний.

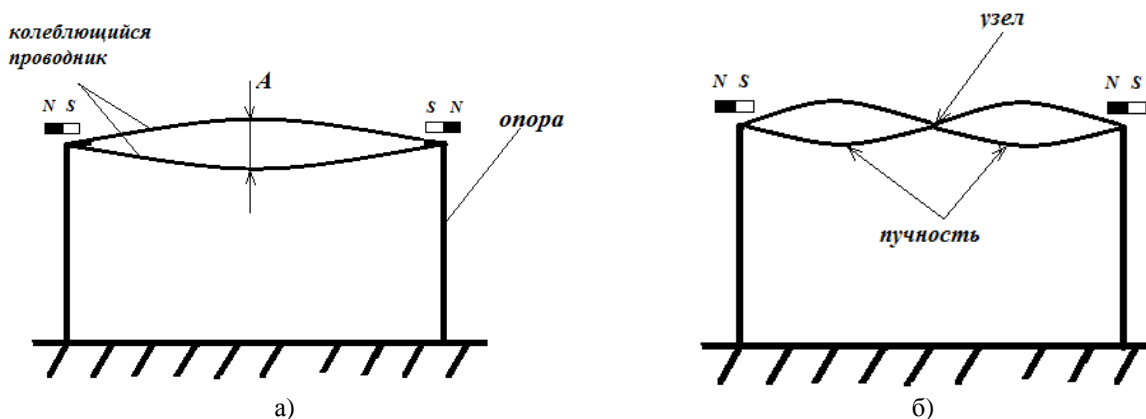


Рис.2 Виды колебаний медного проводника натянутого в струну в зависимости от положения постоянных магнитов.

Для определения влияния температурного поля на колебательный процесс были внесены изменения в лабораторную установку. Расстояние между опорами увеличено до 1,4 м, постоянный магнит закреплен на одной из опор. Величина магнитной индукции вблизи медной проволоки  $\approx 120$  мТл. Натяжение проводника 5 – 7 Н. Температура воздуха в помещении 22 °С.

При протекании через проволоку переменного тока величиной 3,7 А и напряжении 25 В визуально наблюдались поперечные колебания проводника. Размах колебаний – 6 мм. Число полупериодов – 10. Длина волны – 280 мм рис.3. При обдуве проводника вентилятором происходит изменение параметров волны. Размах колебаний – 4 мм. Число полупериодов – 6. Длина волны – 466,6 мм. Увеличение скорости потока воздуха приводит к затуханию волны.

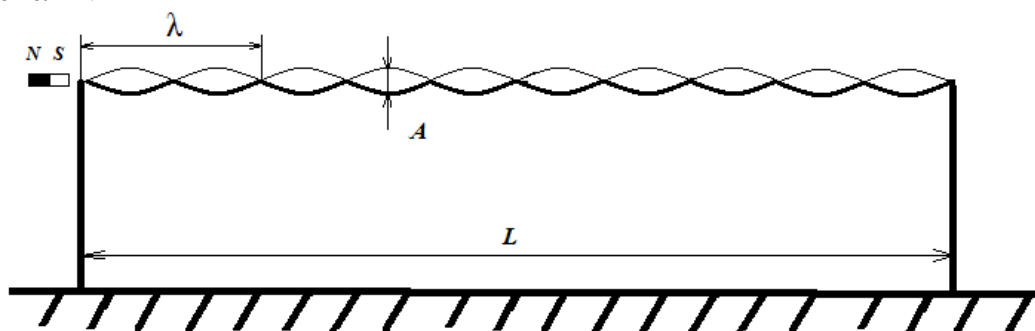


Рис.3. Колебание медного проводника натянутого в струну при расстоянии между опорами  $L=1400$  мм

Из опыта следует, что на колебания влияет способ отвода тепла от проводника, чем эффективнее охлаждение, тем меньше амплитуда колебаний  $A/2$  и больше длина волны  $\lambda$ .

Следует отметить, что магнитное поле постоянного магнита на расстоянии от опоры 200 мм не фиксируется тесламетром Маяк 3М, а волновой процесс проволоки не затухает. Можно предположить, что проводник колеблется под действием термомеханических колебаний. Однако, наличие электромагнитного поля является необходимым условием для возбуждения колебаний в проводнике.

Визуально увидеть колебания медной проволоки можно на сайте БГТУ им. В.Г. Шухова ([eia.bstu.ru](http://eia.bstu.ru)), где находятся видеоролики описанных в данной статье экспериментов.

**Заключение:** Установлены условия для возникновения в проводнике незатухающих колебаний. Экспериментально показано, что на колебательный процесс проводника, натянутого в струну влияет нагрев проводника под действием переменного тока, температура среды, обдув проводника воздушным потоком, упругие свойства проводника и электромагнитное поле.

Результаты экспериментальных исследований могут быть полезны для построения физических моделей электротехнических устройств струнного типа, использоваться для разработки математических моделей нелинейных колебаний и волн.

#### Список литературы

1. Требукова Н.С. Тепловизионные исследования разрыва проводников в условиях протекания максимального тока / Н.С. Требукова, А.Н. Семернин // Світлотехніка та електроенергетика. – 2009. - №1(17). – С 52-56.
2. Сибирцева Н.Б. Особенности разрыва проводников, находящихся под грузом при протекании максимального тока / Н.Б. Сибирцева, А.Н. Семернин // Світлотехніка та електроенергетика. – 2009. - №1(17). – С 91-95.